

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**SÍŤOVÝ NAPÁJECÍ ZDROJ 15 V / 1,5 A S GALVANICKÝM  
ODDĚLENÍM PRO LABORATORNÍ ZAŘÍZENÍ**

OFF-LINE SUPPLY SOURCE 15 V / 1.5 A WITH A GALVANIC SEPARATION FOR A LABORATORY  
EQUIPMENT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Vladimír Pokorný

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

**BRNO 2020**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Vladimír Pokorný

**ID:** 200734

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

## NÁZEV TÉMATU:

**Sít'ový napájecí zdroj 15 V / 1,5 A s galvanickým oddělením pro laboratorní zařízení**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vyrobté a osadíte desku plošných spojů zdroje navrženého v semestrálním projektu.
2. Realizujete vinuté součásti měniče a celou mechanickou konstrukci.
3. Oživíte celý měnič a funkčnost zdokumentujete měřením.
4. Sestavíte zevrubnou dokumentaci ke zdroji (podle pokynů vedoucího).

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Vorel, P., Patočka M.: Průmyslová elektronika. Skriptum FEKT VUT. 2007
- [2] Erickson, R.W., Maksimovic, D.: Fundamentals of Power Electronics. 2004
- [3] Bacha, S., Munteanu, I., Bratcu, A.I.: Power Electronic Converters Modeling and Control. 2014

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 10.6.2020

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem jednočinného spínaného zdroje pro napájení laboratorního zařízení. Požadované parametry zdroje je vstupní síťové napětí 230 V a kmitočet 50 Hz, výstupní stejnosměrné napětí 15 V a výstupní proud nejméně 1,5 A. V úvodu této práce je stručně rozebrána problematika blokových měničů. Následující část je věnována návrhu vysokofrekvenčního transformátoru a silové části. Práce dále pokračuje dimenzováním výkonových součástek včetně jejich chladičů. Následuje návrh řídicí části, ve které je použit integrovaný obvod z rodiny UC384x, a realizace zdroje. Závěr práce se zaměřuje na oživení zdroje a ověřovací měření.

## KLÍČOVÁ SLOVA

spínaný zdroj, blokový měnič, VF transformátor, UC3844, DC/DC měnič

## ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the design of a single-acting switching power supply for a laboratory equipment. The required parameters of the source are input voltage 230 V and frequency 50 Hz, output DC voltage 15 V, and output current at least 1.5 A. The introduction of this thesis briefly describes the operation of flyback converters. The next part is focused on the design of the high-frequency transformer and the main power part. The work continues with the designing of power components and heatsinks. The following part is the design of the control part, which will use an integrated circuit from the UC384x family, and the construction of the power supply. The conclusion of the thesis focuses on the source debugging and verification measurements.

## KEYWORDS

switched-mode power supply, flyback convertor, HF transformer, UC3844, DC/DC convertor

POKORNÝ, Vladimír. *Síťový napájecí zdroj 15 V / 1,5 A s galvanickým oddělením pro laboratorní zařízení*. Brno, 2020, 49 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Síťový napájecí zdroj 15 V / 1,5 A s galvanickým oddělením pro laboratorní zařízení“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

# Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| Seznam symbolů, veličin a zkratk                           | 9         |
| Úvod   | 12        |
| <b>1 Jednočinný blokující měnič – flyback</b>              | <b>13</b> |
| 1.1 Režim spojitého magnetického toku . . . . .            | 14        |
| 1.2 Režim nespojitého magnetického toku . . . . .          | 16        |
| 1.3 Výběr pracovního režimu . . . . .                      | 17        |
| <b>2 Návrh silového obvodu</b>                             | <b>18</b> |
| 2.1 Návrh transformátoru . . . . .                         | 18        |
| 2.1.1 Výpočet počtu závitů pro frekvenci 100 kHz . . . . . | 18        |
| 2.1.2 Pomocné vinutí . . . . .                             | 20        |
| 2.1.3 Proudové dimenzování vinutí . . . . .                | 21        |
| 2.1.4 Skinefekt . . . . .                                  | 21        |
| 2.1.5 Návrh vzduchové mezery . . . . .                     | 22        |
| 2.2 Dimenzování tranzistoru a chladiče . . . . .           | 22        |
| 2.3 Dimenzování výstupní diody . . . . .                   | 23        |
| 2.4 Dimenzování výstupního kondenzátoru . . . . .          | 25        |
| <b>3 Řídicí obvod</b>                                      | <b>28</b> |
| 3.1 Popis pinů součástky . . . . .                         | 28        |
| 3.2 Nastavení spínací frekvence zdroje . . . . .           | 29        |
| 3.3 Návrh snímače proudu . . . . .                         | 30        |
| 3.4 Napěťová zpětná vazba . . . . .                        | 31        |
| 3.5 Schéma zapojení . . . . .                              | 32        |
| <b>4 Návrh a realizace DPS</b>                             | <b>34</b> |
| 4.1 Transformátor . . . . .                                | 34        |
| 4.2 Deska plošných spojů . . . . .                         | 35        |
| <b>5 Oživení a měření</b>                                  | <b>36</b> |
| 5.1 Řídicí obvody . . . . .                                | 36        |
| 5.2 Silová část zdroje a regulace napětí . . . . .         | 37        |
| 5.2.1 Vynechávání pulzů . . . . .                          | 38        |
| 5.3 Regulace proudu . . . . .                              | 39        |
| 5.4 Výstupní dioda . . . . .                               | 40        |
| 5.5 Měření účinnosti . . . . .                             | 40        |

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| <b>Závěr</b>                     | <b>42</b> |
| <b>Literatura</b>                | <b>43</b> |
| <b>Seznam příloh</b>             | <b>45</b> |
| <b>A Přílohy</b>                 | <b>46</b> |
| A.1 Schéma zapojení . . . . .    | 46        |
| A.2 Plošný spoj . . . . .        | 47        |
| A.3 Osazovací plány . . . . .    | 47        |
| A.3.1 Strana součástek . . . . . | 47        |
| A.3.2 Strana spojů . . . . .     | 48        |
| A.4 Seznam součástek . . . . .   | 49        |

## Seznam obrázků

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Základní zapojení blokujícího měniče . . . . .                              | 13 |
| 1.2 | Spojité (a) a nespojité (b) režim magnetických toků . . . . .               | 14 |
| 1.3 | Časové průběhy veličin v měniči při spojitém průběhu mag. toku . . .        | 15 |
| 1.4 | Časové průběhy veličin v měniči při nespojitém průběhu mag. toku .          | 16 |
| 2.1 | Rozměry jádra ETD2910 . . . . .   | 18 |
| 2.2 | Napětí na diodě . . . . .   | 24 |
| 2.3 | Proud kondenzátorem . . . . .   | 25 |
| 2.4 | Průběh proudů na sekundární straně transformátoru . . . . .                 | 26 |
| 3.1 | Vnitřní zapojení IC UCx84x . . . . .  | 29 |
| 3.2 | Popis pinů IC UCx84x pro pouzdro SOIC a PDIP . . . . .                      | 29 |
| 3.3 | Schéma zapojení proudové zpětné vazby . . . . .                             | 31 |
| 3.4 | Schéma zapojení napěťové zpětné vazby . . . . .                             | 32 |
| 3.5 | Schéma zapojení . . . . .   | 33 |
| 4.1 | Navíjecí předpis transformátoru . . . . .                                   | 34 |
| 4.2 | Navržená deska plošných spojů s rozmístěním všech součástek . . . .         | 35 |
| 5.1 | Průběh $U_{GS}$ , IC napájeno z pomocného zdroje . . . . .                  | 36 |
| 5.2 | Průběh $U_{GS}$ (červeně) a $U_{DS}$ (modře) při nominální zátěži . . . . . | 37 |
| 5.3 | Průběh $U_{GS}$ (červeně) a $U_{DS}$ (modře) . . . . .                      | 38 |
| 5.4 | Průběh $U_{GS}$ (modře) a $U_{ISENSE}$ (fialově) . . . . .                  | 39 |
| 5.5 | Průběh na výstupní diodě D1 . . . . .                                       | 40 |
| A.1 | Schéma zapojení . . . . .   | 46 |
| A.2 | Plošný spoj . . . . .   | 47 |
| A.3 | Osazovací plán – pohled ze strany součástek . . . . .                       | 47 |
| A.4 | Osazovací plán – pohled ze strany spojů . . . . .                           | 48 |

## Seznam tabulek

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Parametry jádra transformátoru . . . . .     | 19 |
| 2.2 | Parametry tranzistoru FQPF 3N90 . . . . .    | 23 |
| 2.3 | Parametry diody BYW29-200 . . . . .          | 24 |
| 3.1 | Parametry optočlenu PC817 . . . . .          | 31 |
| 4.1 | Navržené a reální parametry vinutí . . . . . | 34 |
| 5.1 | Vlastní spotřeba zdroje . . . . .            | 40 |
| 5.2 | Účinnost zdroje . . . . .                    | 41 |
| A.1 | Seznam součástek . . . . .                   | 49 |

# Seznam symbolů, veličin a zkratk

| Parametr                 | Popis   | Jednotka               |
|--------------------------|---|------------------------|
| $B_{\max}$               | maximální hodnota magnetické indukce v jádře                            | [T]                    |
| $C_{\text{DS}}$          | parazitní kapacita kanálu tranzistoru mezi <i>drain</i> a <i>source</i> | [F]                    |
| $d_1$                    | průměr vodiče primárního vinutí   | [m]                    |
| $d_2$                    | průměr vodiče sekundárního vinutí                                       | [m]                    |
| $d_3$                    | průměr vodiče pomocného vinutí  | [m]                    |
| $f$                      | frekvence spínání tranzistoru   | [Hz]                   |
| $H_{\text{Femax}}$       | maximální intenzita magnetického pole v jádře                           | [A · m <sup>-1</sup> ] |
| $H_{\text{vmax}}$        | maximální intenzita magnetického pole v mezeře                          | [A · m <sup>-1</sup> ] |
| $i_1$                    | proud primárním vinutím transformátoru                                  | [A]                    |
| $I_{1\text{ef}}$         | efektivní hodnota proudu primárním vinutím                              | [A]                    |
| $I_{1\text{max}}$        | maximální hodnota primárního proudu                                     | [A]                    |
| $i_2$                    | proud sekundárním vinutím transformátoru                                | [A]                    |
| $I_2$                    | výstupní proud měniče   | [A]                    |
| $I_{2\text{ef}}$         | efektivní hodnota proudu sekundárním vinutím                            | [A]                    |
| $I_{2\text{max}}$        | maximální hodnota sekundárního proudu                                   | [A]                    |
| $I_{\text{DS}}$          | maximální dovolený proud <i>drainem</i> a <i>sourcem</i> tranzistoru    | [A]                    |
| $k$                      | převod transformátoru   | [–]                    |
| $l_{\text{Fe}}$          | střední délka magnetické siločáry jádra                                 | [m]                    |
| $I_{\text{FSM}}$         | špičková hodnota proudu diodou  | [A]                    |
| $I_{\text{stř}}$         | střední hodnota proudu  | [A]                    |
| $l_v$                    | délka vzduchové mezery  | [m]                    |
| $L_p$                    | sériová parazitní indukčnost primárního vinutí                          | [H]                    |
| $L_1$                    | indukčnost primárního vinutí transformátoru                             | [H]                    |
| $N_1$                    | počet závitů primárního vinutí transformátoru                           | [–]                    |
| $N_2$                    | počet závitů sekundárního vinutí transformátoru                         | [–]                    |
| $N_3$                    | počet závitů pomocného vinutí transformátoru                            | [–]                    |
| $P_{\text{ved}}$         | ztráty způsobené vedením  | [W]                    |
| $P_{\text{přep}}$        | přepínací ztráty  | [W]                    |
| $P_{\text{ztr}}$         | ztrátový výkon  | [W]                    |
| $R_z$                    | odpor představující zátěž na výstupu měniče                             | [Ω]                    |
| $R_{\text{DS(ON)}}$      | odpor tranzistoru v sepnutém stavu                                      | [Ω]                    |
| $R_{\vartheta\text{JC}}$ | tepelný odpor mezi čipem a pouzdrem                                     | [Ω]                    |
| $s$                      | střída spínání tranzistoru  | [–]                    |
| $S_{\text{Cu1}}$         | průřez primárního vinutí  | [m <sup>2</sup> ]      |
| $S_{\text{Cu2}}$         | průřez sekundárního vinutí  | [m <sup>2</sup> ]      |

|             |  |                                       |
|-------------|--|---------------------------------------|
| $S_{Cu3}$   | průřez pomocného vinutí  | [m <sup>2</sup> ]                     |
| $S_{Fe}$    | plocha sloupku jádra ETD2910   | [m <sup>2</sup> ]                     |
| $T$         | perioda  | [s]                                   |
| $t_{rr}$    | doba zpětného zotavení diody   | [s]                                   |
| $t_1$       | doba sepnutí tranzistoru   | [s]                                   |
| $t_2$       | doba vypnutí tranzistoru   | [s]                                   |
| $u_1$       | napětí na primárním vinutí transformátoru                                  | [V]                                   |
| $u_2$       | napětí na sekundárním vinutí transformátoru                                | [V]                                   |
| $u_{CE}$    | napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru                              | [V]                                   |
| $U_D$       | napětí v meziobvodu  | [V]                                   |
| $U_{DSmax}$ | maximální dovolené napětí mezi <i>drainem</i> a <i>sourcem</i> tranzistoru | [V]                                   |
| $U_f$       | úbytek napětí na diodě v propustném směru                                  | [V]                                   |
| $U_{rrm}$   | maximální závěrné napětí diody   | [V]                                   |
| $U'_1$      | velikost napětí na primárním vinutí při vypnutém tranzistoru               | [V]                                   |
| $U_2$       | výstupní napětí měniče   | [V]                                   |
| $U_{VCC}$   | napájecí napětí řídicího obvodu  | [V]                                   |
| $W_{off}$   | energie uvolněná při vypnutí tranzistoru                                   | [J]                                   |
| $U_{th}$    | prahové napájecí napětí integrovaného obvodu                               | [V]                                   |
| $U_{ZD}$    | napětí na zenerově diodě   | [V]                                   |
| $\Delta W$  | rozdíl energie naakumulované v jádře a ve vzduchové mezeře                 | [J]                                   |
| $\delta$    | hloubka vniku  | [m]                                   |
| $\rho$      | měrný elektrický odpor vodiče  | [Ω·m]                                 |
| $\Phi$      | magnetický tok v jádře transformátoru                                      | [Wb]                                  |
| $\Psi$      | spřažený magnetický tok  | [Wb]                                  |
| $\mu_{rFe}$ | relativní permeabilita materiálu CF139                                     | [–]                                   |
| $\mu_0$     | permeabilita vakua   | [kgmA <sup>-2</sup> s <sup>-2</sup> ] |
| $\omega$    | úhlová frekvence   | [s <sup>-1</sup> ]                    |
| $\tau_{RC}$ | časová konstanta RC filtru   | [s]                                   |
| $\eta$      | účinnost   | [%]                                   |

| Zkratka | Popis   |
|---------|---|
| C       | kondenzátor   |
| D       | dioda   |
| DC      | Direct Current (stejnoseměrný proud)  |
| DPS     | Deska Plošných Spojů  |
| ESR     | Ekvivalentní Sériový Odpor  |
| LED     | Light Emitting Diode (dioda emitující světlo)                               |
| MOSFET  | Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (polem řízený tranzistor) |
| NTC     | Negative Temperature Coefficient (negativní teplotní koeficient)            |

|     |   |
|-----|---|
| PE  | ochranný vodič  |
| PWM | Pulse Width Modulation (pulzní šířková modulace)            |
| SMD | Surface Mount Device (pouzdro určené pro povrchovou montáž) |
| T   | tranzistor  |
| THT | Through-hole technology (pouzdro s drátovými vývody)        |
| VF  | Vysoká Frekvence  |
| z.  | závity  |

# Úvod

V současné době se se spínanými zdroji můžeme setkat na každém kroku. Nejenže jsou menší a mají menší hmotnost, ale mají také vyšší účinnost než stejně výkonné lineární zdroje. Velké rozšíření spínaných zdrojů je způsobeno také snahou o jejich miniaturizaci. Díky tomu se výrobci polovodičových součástek předhánějí, kdo vyvine účinnější a přesnější regulátor v co nejmenším pouzdře. To vede k tomu, že jsou tyto obvody dostupnější než tomu bylo kdysi.

Pro menší výkony je vhodné použít spínaný zdroj s blokujícím měničem, který bude pracovat při frekvenci 10 kHz – 500 kHz. Při vyšším kmitočtu lze spínané zdroje vyrobit v menším objemu a s nižší hmotností. Spínané zdroje mají oproti lineárním zdrojům velkou nevýhodu v podobě *vf* rušení, kterým ruší ostatní zařízení připojená do distribuční sítě. Proto se na vstup umísťuje síťový filtr, aby zařízení vyhovělo normám pro elektromagnetickou kompatibilitu.

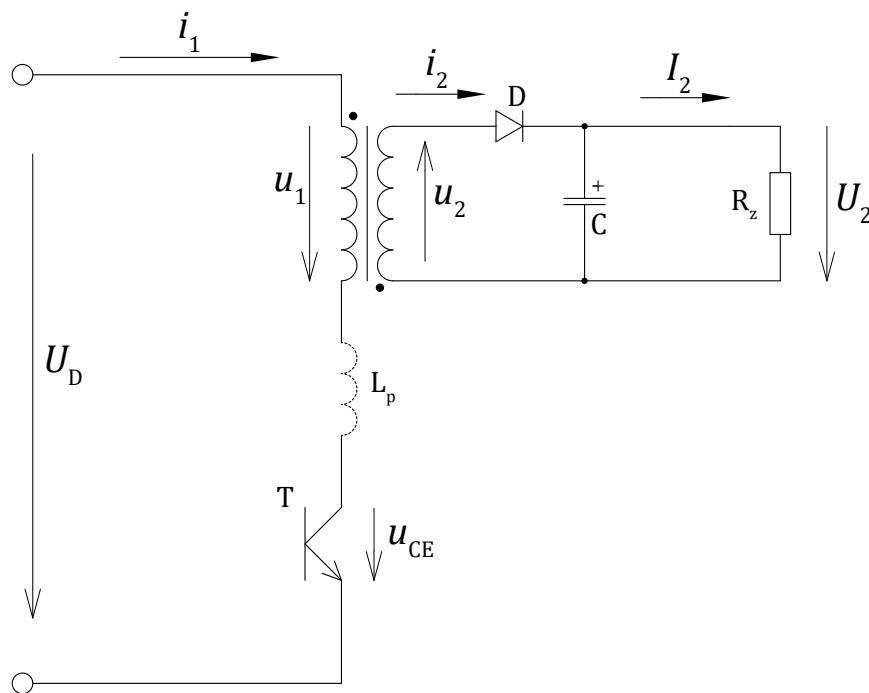
Cílem této práce je navrhnout a zkonstruovat spínaný zdroj pro napájení pomocných a řídicích obvodů velkého zdroje 20 kW, umístěného v laboratoři Ústavu výkonové elektroniky a elektrotechniky. Zdroj bude napájen síťovým napětím 230 V/50 Hz. Frekvence spínání bude přibližně 100 kHz. Požadované stejnosměrné výstupní napětí je 15 V, výstupní proud musí být nejméně 1,5 A. Požadovaný výstupní výkon zdroje bude tedy přibližně 23 W při napětí 15 V.

Návrh spínaného zdroje je rozdělen do několika částí, které na sebe logicky navazují. Nejprve navrhne srdce celého zdroje – vysokofrekvenční transformátor, poté budeme dimenzovat polovodičové součástky včetně chladičů a na závěr odladíme řídicí obvody zdroje. Chybět nebude ani návrh desky plošných spojů, výrobení a měření na funkčním zařízení.



# 1 Jednočinný blokující měnič – flyback

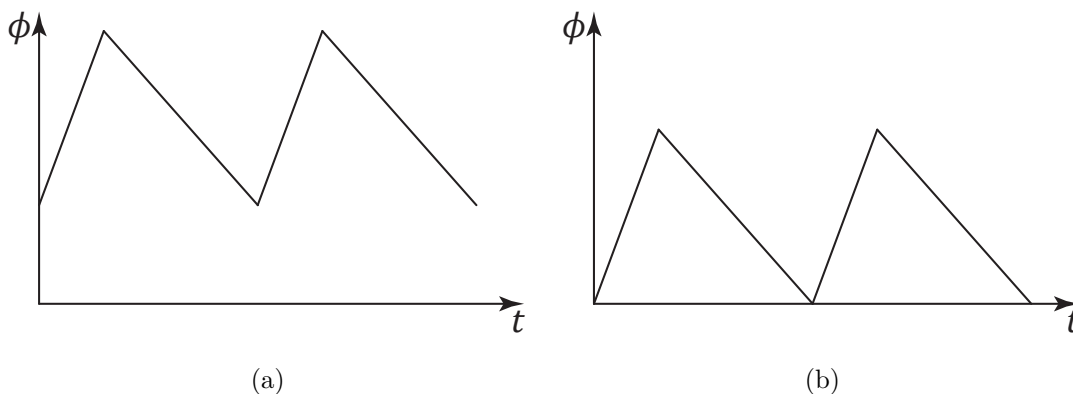
Jednočinný blokující měnič se díky malému počtu součástek a jednoduché konstrukci používá zejména u malých spínaných zdrojů. Následující obrázek zachycuje principiální zapojení blokujícího měniče.



Obr. 1.1: Základní zapojení blokujícího měniče, překresleno z [2]

Jak vidíme na Obr. 1.1, ve schématu chybí výstupní filtrační tlumivka, kterou u blokujícího měniče zastává transformátor. Tečkovaná sériová indukčnost  $L_p$  je rozptylová parazitní indukčnost transformátoru. Ta zapříčiňuje napěťový překmit při vypínání tranzistoru. Velikost napěťového překmitu je závislá na velikosti vypínaného proudu a rychlosti vypínání tranzistoru. Obecně platí, že čím větší vypínaný proud a čím kratší čas vypínání, tím je napěťový překmit vyšší. Napěťové překmity jsou nežádoucí a napěťově namáhají tranzistor. Z toho důvodu je zapotřebí realizovat pomocné obvody na omezení přepětí.

Jednočinný blokující měnič může z hlediska magnetického toku v jádře transformátoru pracovat v zásadě ve dvou režimech. (Obr. 1.2) Jedním je režim spojitého magnetického toku, při kterém magnetický tok  $\Phi$  v jádře neklesne na nulu. Oproti tomu v režimu nespojitého magnetického toku dochází během jedné periody k úplnému zániku magnetického toku v jádře transformátoru.



Obr. 1.2: Spojitý (a) a nespojitý (b) režim magnetických toků, překresleno z [2]

V následujících kapitolách bude popsána činnost jednočinného blokuujícího měniče v obou režimech. Zavedeme si zjednodušující předpoklad, že odpory vinutí transformátoru jsou nulové. Tímto zjednodušením obdržíme průběhy proudů aproximované přímkami.

## 1.1 Režim spojitého magnetického toku

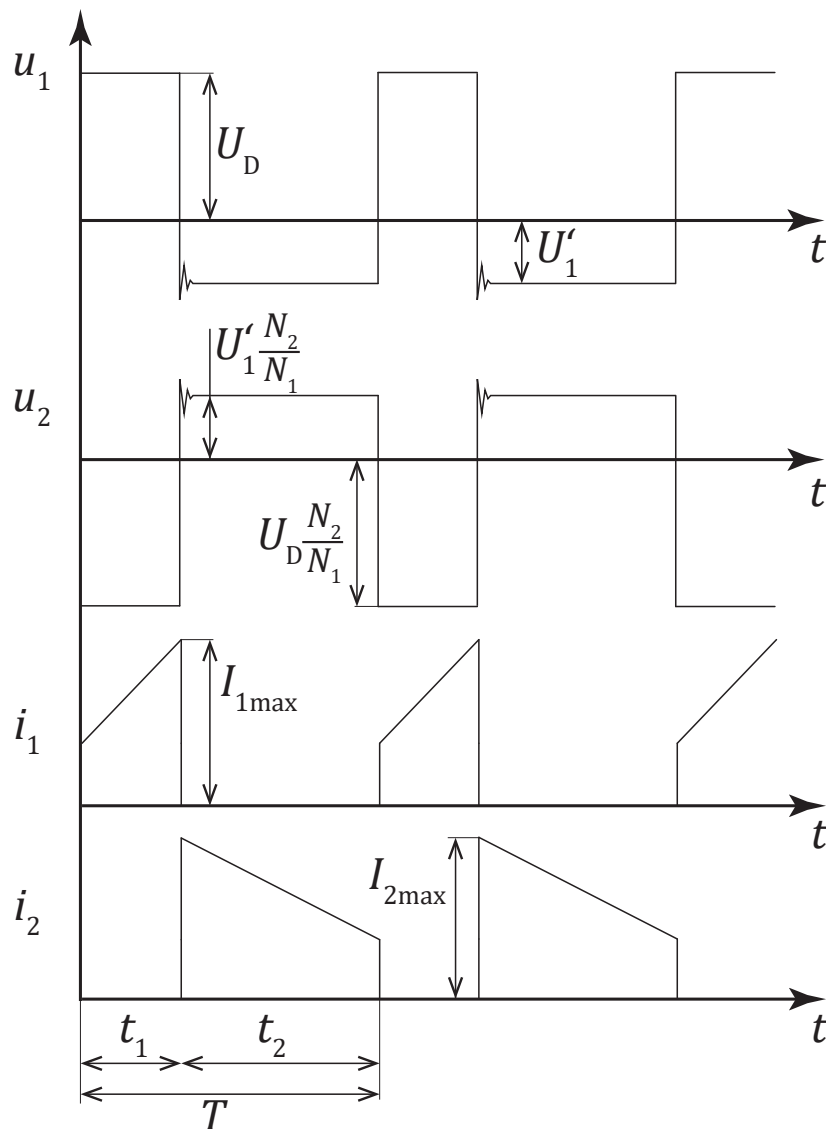
Obr 1.3 názorně zachycuje průběhy sledovaných veličin v režimu spojitého magnetického toku.

Na začátku doby  $t_1$  sepneme tranzistor T, a tím vnutíme primárnímu vinutí napětí  $u_1 = U_D$ . Napětí  $u_2$  na sekundární cívce bude mít v tu chvíli opačnou polaritu než v době před zapnutím tranzistoru T. Dioda se tím polarizuje do závěrného směru. Doba zpětného zotavení diody  $t_{tr}$  není nulová a dioda je po dobu zotavování schopna přenášet proud, i když je na ní přiloženo napětí orientované v závěrném směru. Tato vlastnost diod ovlivňuje chod měniče tím, že proudově namáhá tranzistor, který musí převzít proud  $i_1$  svázaný s tokem  $\Phi$  v jádře a zároveň musí dodat energii do zotavovacího procesu diody. To způsobí, že při skokovém nárůstu proudu  $i_1$  na začátku doby  $t_1$  z nulové hodnoty dochází k proudové špičce, která odezní po úplném uzavření diody. Po uzavření diody se proud  $i_1$  ustálí na hodnotě, která je rovna:

$$I_1 = \frac{N_1 \cdot \Phi}{L_1}. \quad (1.1)$$

Proud  $i_1$  je v tuto chvíli proudem magnetizačním, který lineárně roste až do hodnoty  $I_{1max}$ . Sekundárním vinutím po uzavření diody D proud neteče. Zátěž je v tomto časovém intervalu  $t_2$  napájena pouze z kondenzátoru C. Po uplynutí doby  $t_1$  vypínáme tranzistor. Magnetický tok v jádře má v tuto chvíli maximální hodnotu.

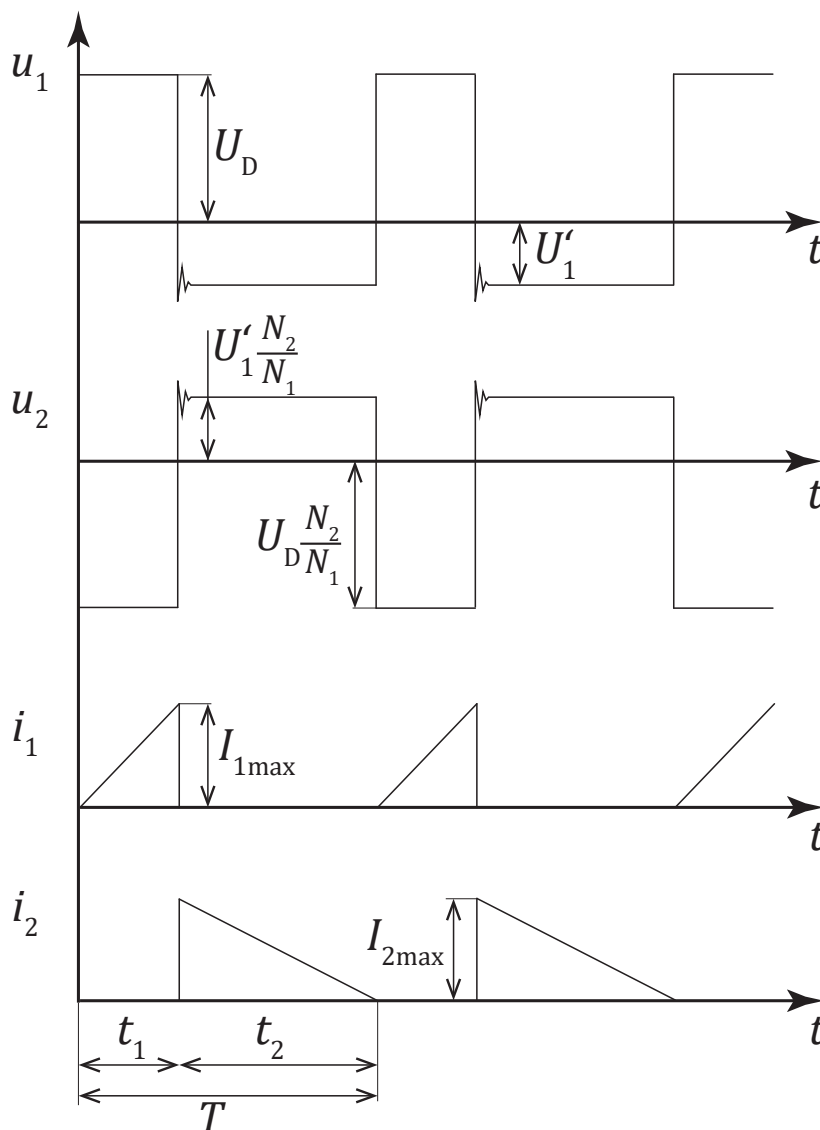
V době  $t_2$  je tranzistor vypnutý, z předchozího cyklu je v jádře transformátoru akumulován tok  $\Phi$ . Protože magnetický tok  $\Phi$  je svázan s elektrickým proudem, musí



Obr. 1.3: Časové průběhy veličin v měniči při spojitém průběhu mag. toku, překresleno z [1]

jedním nebo druhým vinutím téct elektrický proud. Primárním vinutím elektrický proud téct nemůže, protože je tranzistor vypnutý. Proto musí téct proud sekundárním vinutím. Díky tomu se na sekundárním vinutí objeví takové napětí  $u_2$ , aby mohl téct proud  $i_2$ . Proud  $i_2$  na začátku doby  $t_2$  musí skokově vzrůst na maximální hodnotu  $I_{2\max}$ . Během doby  $t_2$  se transformátor demagnetizuje do zátěže, protože proud  $i_2$  je orientován v propustném směru diody D. Zároveň dochází k akumulování energie v kondenzátoru C. Proud  $i_2$  lineárně klesá s časem. Po uplynutí časového intervalu  $t_2$  zapínáme tranzistor a tím se dostáváme do výchozí bodu popisu. [2]

## 1.2 Režim nespojitého magnetického toku



Obr. 1.4: Časové průběhy veličin v měniči při nespojitém průběhu mag. toku, překresleno z [2]

Při tomto režimu dochází v jedné periodě k magnetování a následně k úplnému demagnetování transformátoru, při kterém magnetický tok  $\Phi$  v jádře za dobu jedné periody  $T$  zcela zanikne.

Činnost měniče v režimu nespojitého magnetického toku je podobná jako v kapitole 1.1, jen s tím rozdílem, že v tomto režimu nespojitého magnetického toku dochází k úplnému zániku toku  $\Phi$  v jádře.

V době  $t_1$  je tranzistor T sepnut, probíhá magnetizace jádra a proud primárním vinutím  $i_1$  lineárně roste. Společně s primárním proudem roste i magnetický tok  $\Phi$ . Dioda D na sekundární straně je polarizována v závěrném směru, sekundárním vinutím neteče proud. Uzavření diody je téměř okamžité, protože dioda před sepnutím tranzistoru nevedla proud. Zátěž je v tuto chvíli napájena pouze z nabitého kondenzátoru C. Na konci doby  $t_1$  je hodnota proudu  $i_1$  maximální, stejně tak i tok  $\Phi$  dosáhl maximální hodnoty.

Po vypnutí tranzistoru dochází k demagnetizaci jádra pomocí sekundárního vinutí. Dioda je polarizována v propustném směru. Kondenzátor a zátěž je napájena lineárně klesajícím proudem  $i_2$ . Cívka je přes otevřenou diodu připojena ke kondenzátoru C, který pro ni představuje zdroj konstantního napětí  $U_2$ . Tímto způsobem se cívka demagnetizuje. Před uplynutím doby  $t_2$  dojde k zániku toku  $\Phi$  v jádře, tím pádem zaniká i demagnetizační proud  $i_2$ . Dioda je připravena přejít okamžitě do závěrného stavu, protože přes ni už proud  $i_2$  neprochází. [2]

### 1.3 Výběr pracovního režimu

Aby byla zajištěna bezchybná práce měniče, musíme před zahájením návrhu určit vhodný režim, ve kterém bude měnič pracovat. V předchozích kapitolách byly popsány režimy spojitého a nespojitého magnetického toku v jádře.

Činnost jednočinného blokujícího měniče bude optimálnější v režimu s nespojitým magnetickým tokem, kdy spřažený tok  $\Psi_{\min} = 0$ . Úvaha vyplývá z rovnice (1.2) uvedené v [2]

$$\Delta W = \frac{1}{2} \frac{\Psi_{\max}^2}{L_1} - \frac{1}{2} \frac{\Psi_{\min}^2}{L_1} = \frac{1}{2} \frac{(\Psi_{\min} + \Delta\Psi)^2}{L_1} - \frac{1}{2} \frac{\Psi_{\min}^2}{L_1} = \frac{1}{2L_1} (2\Psi_{\min}\Delta\Psi + \Delta\Psi^2) \quad (1.2)$$

V rovnici (1.2) vidíme, že množství přenášené energie  $\Delta W$  je dáno druhou mocninou zdvihu  $\Delta\Psi$ , ale pouze první mocninou minimální hodnoty  $\Psi_{\min}$ . Z toho plyne, že zvýšení minimální hodnoty  $\Psi_{\min}$  není tolik energeticky přínosné jako zvýšení hodnoty  $\Delta\Psi$ . Optimální stav je dosažen při splnění podmínky  $\Psi_{\min} = 0$ , tedy v režimu nespojitého magnetického toku. [2]

Dalšími výhodami režimu s nespojitým magnetickým tokem je fakt, že nedochází k přechodovým jevům na tranzistoru, způsobených skokovou změnou proudu při přebírání magnetizačního proudu svázaného s tokem v jádře. Zároveň diodou D při zapnutí tranzistoru neprochází proud, k jejímu přechodu do závěrného stavu dojde prakticky okamžitě. Všechny tyto výhody omezují proudové špičky tranzistorem, které následně způsobují chybu v měření proudu. tato chyba v měření vede k chybné regulaci, při které může dojít k vynechávání budicích pulzů PWM. Nevýhodou zvoleného režimu je naopak větší zvlnění proudů, a tím i vyšší efektivní hodnota proudu, která s sebou nese potřebu zvolit větší průřez vinutí.

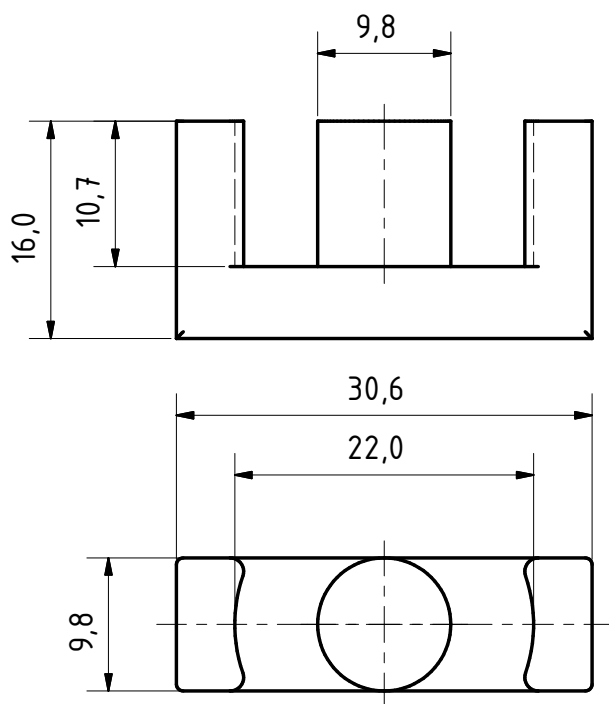
## 2 Návrh silového obvodu

### 2.1 Návrh transformátoru

Transformátor je jedním z hlavních prvků spínaného zdroje, proto mu budeme v následující kapitole věnovat patřičnou pozornost.

Rozměry a materiál jádra jsou závislé na přenášeném výkonu a pracovní frekvenci. V praxi platí, že čím vyšší je spínací frekvence při konstantním výkonu, tím je potřeba jádro menších rozměrů. [4]

Vzhledem k požadavku využití skladových zásob bylo vybráno jádro ETD2910 vyrobené z materiálu CF139. Rozměrový výkres jádra ETD2910 je na Obr. 2.1. Parametry, které povedou ke správnému výpočtu transformátoru jsou uvedeny v tabulce 2.1.



Obr. 2.1: Rozměry jádra ETD2910, převzato z [5]

#### 2.1.1 Výpočet počtu závitů pro frekvenci 100 kHz

Abychom mohli začít řešit návrh transformátoru, musíme určit střídu, při které bude měnič pracovat. Střídu určíme jako poměr indukovaného napětí na primární cívce při vypnutém tranzistoru a maximálního dovoleného napětí na tranzistoru. S ohledem

Tab. 2.1: Parametry jádra ETD2910 [5]

| parametr        | hodnota | jednotka      | poznámka                     |
|-----------------|---------|---------------|------------------------------|
| $S_{\text{Fe}}$ | 75      | $\text{mm}^2$ | průřez jádra                 |
| $l_{\text{Fe}}$ | 71      | mm            | délka střední siločáry       |
| $\mu_r$         | 2100    | —             | relativní permeabilita jádra |

na použitý tranzistor volíme napětí na tranzistoru  $U_{\text{DSmax}}$  jako:

$$U_{\text{DSmax}} = U_{\text{D}} + U_1' = 325 + 140 = 465 \text{ V}.^1 \quad (2.1)$$

Následně můžeme stanovit střihu:

$$s = \frac{U_1'}{U_{\text{DSmax}}} = \frac{140}{465} = 0,301. \quad (2.2)$$

Poměr vinutí transformátoru určíme jako poměr středních hodnot napětí na sekundární a primární cívce.

$$k = \frac{U_2 \cdot (1 - s)}{U_{\text{D}} \cdot s} = \frac{15 \cdot (1 - 0,301)}{325 \cdot 0,301} = 0,1071 \quad (2.3)$$

Indukčnost primárního vinutí odvodíme dosazením rov. (2.5) za  $I_{1\text{max}}$  do rov. (2.4).

$$L_1 = \frac{U_{\text{D}} \cdot t_{\text{zap}}}{I_{1\text{max}}} \quad (2.4)$$

$$I_{1\text{max}} = I_{2\text{max}} \cdot \frac{N_2}{N_1} = \frac{2 \cdot I_2}{1 - s} \cdot k \quad (2.5)$$

$$L_1 = \frac{U_{\text{D}} \cdot t_{\text{zap}}}{I_{1\text{max}}} = \frac{U_{\text{D}} \cdot s \cdot (1 - s)}{2 \cdot I_2 \cdot k \cdot f} = \frac{325 \cdot 0,301 \cdot (1 - 0,301)}{2 \cdot 2 \cdot 0,1071 \cdot 100 \cdot 10^3} = 1,596 \text{ mH} \quad (2.6)$$

Pro dimenzování polovodičů a vinutí musíme ještě určit maximální a efektivní hodnoty proudů. Proud  $I_{1\text{max}}$  vyčíslíme dosazením do rovnice (2.5).

$$I_{1\text{max}} = \frac{2 \cdot I_2}{1 - s} \cdot k = \frac{2 \cdot 2}{1 - 0,301} \cdot 0,1071 = 0,613 \text{ A} \quad (2.7)$$

Podobně vypočítáme i proud  $I_{2\text{max}}$ .

$$I_{2\text{max}} = \frac{2 \cdot I_2}{1 - s} = \frac{2 \cdot 2}{1 - 0,301} = 5,72 \text{ A} \quad (2.8)$$

---

<sup>1</sup>Ve skutečnosti bude na tranzistoru větší napětí, vlivem napěťových špiček způsobených přepínáním indukčnosti.

Efektivní hodnota primárního proudu  $i_1$  je dána vztahem (2.9).

$$I_{1\text{ef}} = \frac{I_{1\text{max}} \cdot \sqrt{s}}{\sqrt{3}} = \frac{0,613 \cdot \sqrt{0,301}}{\sqrt{3}} = 0,194 \text{ A} \quad (2.9)$$

Pro efektivní hodnotu proudu sekundárním vinutím platí vztah (2.10).

$$I_{2\text{ef}} = \frac{2 \cdot I_2}{1 - s} \cdot \frac{\sqrt{1 - s}}{\sqrt{3}} = \frac{2 \cdot 2}{1 - 0,301} \cdot \frac{\sqrt{1 - 0,301}}{\sqrt{3}} = 2,76 \text{ A} \quad (2.10)$$

V tuto chvíli můžeme přistoupit k výpočtu počtu závitů, dimenzování jednotlivých vinutí a procentnímu zaplnění okna transformátoru.

Vycházíme ze spřaženého magnetického toku.

$$\Psi_{\text{max}} = N \cdot \Phi_{\text{max}} = N \cdot B_{\text{max}} \cdot S_{\text{Fe}} = L_1 \cdot I_{1\text{max}} \quad (2.11)$$

Z rovnice (2.11) můžeme vyjádřit vztah pro počet závitů primárního vinutí. Maximální syčení jádra ETD2910 je dle datasheetu [5]  $B_{\text{max}} = 390 \text{ mT}$ . Pro návrh transformátoru je však vhodnější zvolit maximální syčení jádra o něco menší, abychom malou chybou při realizaci transformátoru jádro nepřesýtili. Proto pro náš návrh zvolíme  $B_{\text{max}} = 300 \text{ mT}$ . [4]

$$N_1 = \frac{L_1 \cdot I_{1\text{max}}}{B_{\text{max}} \cdot S_{\text{Fe}}} = \frac{1,596 \cdot 10^{-3} \cdot 0,613}{0,3 \cdot 7,54 \cdot 10^{-5}} = 43,48 \quad (2.12)$$

Toto číslo zatím nezaokrouhlujeme, ale přepočítáme závity primárního vinutí na sekundární stranu.

$$N_2 = N_1 \cdot k = 43,48 \cdot 0,1071 = 4,65 \rightarrow N_2 = 5 \text{ z.} \quad (2.13)$$

Znovu přepočítáme závity, tentokrát na primární stranu. Tímto přepočtem se nejvíce přiblížíme navrhovanému převodu transformátoru  $k$ .

$$N_1 = \frac{N_2}{k} = \frac{5}{0,1071} = 46,69 \rightarrow N_1 = 47 \text{ z.} \quad (2.14)$$

Z předchozích rovnic můžeme nabýt dojmu, že navrhujeme tlumivku. Tento dojem je správný, neboť transformátor blokujícího měniče pracuje v tlumivkovém režimu. Podobně jako u tlumivky, i tady budeme navrhovat výšku vzduchové mezery. Naproti tomu u propustného měniče bychom vzduchovou mezeru hledali těžko.

## 2.1.2 Pomocné vinutí

Pomocné vinutí napájí řídicí obvody. Počet závitů pomocného vinutí se vypočítá pomocí rovnice (2.15).

$$N_3 = N_1 \cdot \frac{U_{\text{th}}}{U_1} = 47 \cdot \frac{17,5}{325} = 2,53 \rightarrow N_3 = 3 \text{ z.} \quad (2.15)$$

Napětí  $U_{\text{th}}$  je prahové napájecí napětí řídicího obvodu. [7]



### 2.1.3 Proudové dimenzování vinutí

Správně zvolený průřez vinutí zajistí optimální teplotu transformátoru při chodu a nízké ztráty vedením. Pro náš návrh uvažujeme proudovou hustotu  $J = 3 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ .

Průřez primárního vinutí určíme ze vztahu (2.16) dosazením  $I_{1\text{ef}}$  z (2.9).

$$S_{\text{Cu1}} = \frac{I_{1\text{ef}}}{J} = \frac{0,194}{3} = 0,065 \text{ mm}^2 \quad (2.16)$$

Následně vypočítáme průměr vodiče primárního vinutí.

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\text{Cu1}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,065}{\pi}} = 0,288 \text{ mm} \quad (2.17)$$

Podobně postupujeme i u sekundárního vinutí, za proud  $I_{2\text{ef}}$  dosazujeme z (2.10).

$$S_{\text{Cu2}} = \frac{I_{2\text{ef}}}{J} = \frac{2,76}{3} = 0,92 \text{ mm}^2 \quad (2.18)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\text{Cu2}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,92}{\pi}} = 1,08 \text{ mm} \quad (2.19)$$

Pomocné vinutí bude napájet pouze řídicí obvod. Z toho důvodu bude využit vodič průměru 0,35 mm ze skladových zásob.

$$S_{\text{Cu3}} = 0,1 \text{ mm}^2 \quad (2.20)$$

$$d_3 = 0,35 \text{ mm} \quad (2.21)$$

### 2.1.4 Skinefekt

Vlivem vysoké frekvence je třeba vinutí dimenzovat i s ohledem na skin efekt<sup>2</sup> Zavádí se proto pojem „Hloubka vniku“. Hloubka vniku udává maximální poloměr vodiče, který lze ještě při dané frekvenci efektivně využít. [2]

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (2.22)$$

Kde  $\rho$  a  $\mu$  udávají měrný elektrický odpor a permeabilitu vodiče, u kterého nás zajímá hloubka vniku. Pro Cu a Al vodiče dosazujeme  $\mu = \mu_0$ . Pro frekvenci  $f = 100 \text{ kHz}$  je hloubka vniku rovna:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} = 0,21 \text{ mm}. \quad (2.23)$$

---

<sup>2</sup>Skinefekt je jev, při kterém dochází k vytlačování střídavého proudu o vysoké frekvenci směrem ze středu vodiče. Efektivní průřez vodiče je kvůli skinefektu menší než nominální. [2]

Největší možný průměr vodiče je tedy:

$$d_{\max} = 2 \cdot \delta = 2 \cdot 0,21 = 0,42 \text{ mm.} \quad (2.24)$$

Porovnáním maximálního průměru s vypočtenými průměry jednotlivých vinutí vidíme, že sekundární vinutí budeme muset vést svazkovým vodičem.

Svazkové vodiče, známé také jako *RUPALIT*<sup>3</sup>, se v elektrotechnické praxi využívají pro eliminaci skin efektu. Jsou složeny z většího počtu paralelních vodičů o průměru menším jako  $d_{\max}$ .

S ohledem na skladové zásoby bude pro primární vinutí použit *RUPALIT*® Classic  $30 \times 0,05 \text{ mm}$  vinutý bifilárně. Sekundární vinutí bude vinuto jedním vodičem *RUPALIT*® Safety  $30 \times 0,2 \text{ mm}$ .

### 2.1.5 Návrh vzduchové mezery

Magnetická energie se snáze ukládá do vzduchové mezery než do feromagnetika. Návrh vzduchové mezery je tedy u jednočinného blokujícího měniče rozhodující pro optimální činnost měniče. [2]

Při výpočtu vycházíme z toho, že součet úbytků na vzduchové mezeře a na feromagnetiku je roven budícímu napětí magnetickému napětí. [4]

$$N_1 \cdot I_{1\max} = H_{v\max} \cdot l_v + H_{Fe\max} \cdot l_{Fe} = \frac{B_{\max}}{\mu_0} \cdot l_v + \frac{B_{\max}}{\mu_0 \cdot \mu_{rFe}} \cdot l_{Fe} \quad (2.25)$$

Vyjádřením délky vzduchové mezery z rovnice (2.25) obdržíme vztah, do kterého můžeme rovnou dosadit.

$$l_v = \frac{N_1 \cdot I_{1\max} \cdot \mu_0}{B_{\max}} - \frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}} = \frac{47 \cdot 0,613 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{0,3} - \frac{0,071}{2100} = 0,087 \text{ mm} \quad (2.26)$$

## 2.2 Dimenzování tranzistoru a chladiče

Pro napětí v meziobvodu  $U_D = 325 \text{ V}$  je vhodné použít MOSFET tranzistor. Kromě napětí v meziobvodu musíme ještě počítat s napětovými špičkami, které jsou způsobeny vypínáním indukčnosti primárního vinutí. S ohledem na tuto skutečnost je třeba vybírat tranzistor s dovoleným napětím nejméně  $650 \text{ V}$ . Dalším kritériem výběru správného tranzistoru je dovolený proud tranzistorem. Tranzistor musí být dimenzován na špičkový proud primárním vinutím. V našem případě je z rovnice (2.7) zřejmé, že  $I_{1\max} = 0,613 \text{ A}$ .

Měnič budeme provozovat v režimu nespojitého magnetického toku, při kterém se předpokládá vypínání tranzistoru při nulovém procházejícím proudu (viz Obr. 1.2).

<sup>3</sup>RUPALIT® je ochrannou známkou společnosti Rudolf Pack GmbH & Co

Tato skutečnost by měla vést k potlačení rušení na čidle proudu vlivem vypínání tranzistoru.

S ohledem na využití skladových zásob byl vedoucím práce doporučen tranzistor FQPF 3N90. Parametry tranzistoru nezbytné pro výpočty jsou v Tab. 2.2.

Tab. 2.2: Parametry tranzistoru FQPF 3N90 [9]

| parametr           | hodnota | jednotka  | poznámka  |
|--------------------|---------|-----------|---|
| $U_{DS}$           | 900     | V         | maximální dovolené napětí mezi <i>drain</i> a <i>source</i> tranzistoru |
| $I_D$              | 2,1     | A         | maximální dovolený proud <i>drainem</i>                                 |
| $R_{DS(ON)}$       | 4,25    | $\Omega$  | statický odpor kanálu při sepnutém tranzistoru                          |
| $t_{on}$           | 145     | ns        | doba otevření tranzistoru z uzavřeného stavu                            |
| $t_{off}$          | 170     | ns        | doba úplného uzavření tranzistoru z otevřeného stavu                    |
| $R_{\vartheta JC}$ | 2,9     | $KW^{-1}$ | tepelný odpor mezi čipem a pouzdrem tranzistoru                         |

Pro správné určení chladiče je třeba znát výkonové ztráty tranzistoru. Jako první určíme ztráty vedením, které jsou způsobeny procházejícím proudem přes odpor kanálu  $R_{DS(ON)}$ .

$$P_{ved} = R_{DS(ON)} \cdot I_{1ef}^2 = 4,25 \cdot 0,194^2 = 0,16 \text{ W} \quad (2.27)$$

Přepínací ztráty jsou způsobeny nabíjením resp. vybíjením parazitních kapacit mezi kanálem a *gate* tranzistoru.

$$P_{přep} = f \cdot W_{off} = \frac{f \cdot U_d \cdot I_{1max} \cdot t_{off}}{4} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 325 \cdot 0,613 \cdot 170 \cdot 10^{-9}}{4} = 0,85 \text{ W} \quad (2.28)$$

V tuto chvíli můžeme stanovit tepelný odpor chladiče. Teplotu okolí uvažujeme  $\vartheta_o = 40^\circ\text{C}$ . Povrchovou teplotu chladiče uvažujeme  $\vartheta_H = 60^\circ\text{C}$

$$R_{\vartheta H} = \frac{\vartheta_H - \vartheta_o}{P_{ved} + P_{přep}} - R_{\vartheta JC} = \frac{60 - 40}{0,16 + 0,85} - 2,9 = 16 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (2.29)$$

Tato hodnota tepelného odporu chladiče odpovídá jednoduchým chladičům z ohýbaného plechu. Chladiče se vyrábí pro různá pouzdra. V našem případě volíme chladič pro pouzdro tranzistoru TO-220.

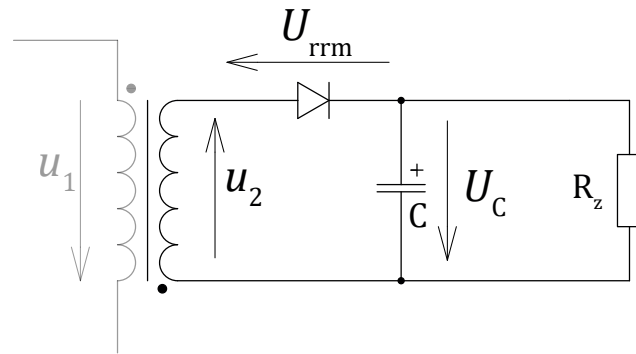
## 2.3 Dimenzování výstupní diody

Při rozepnutí tranzistoru začne sekundárním vinutím procházet proud, který je orientován v propustném směru diody. Dioda tvoří jednocestný usměrňovač. Vzhledem

k vysoké spínací frekvenci ( $f = 100 \text{ kHz}$ ) musíme vybírat z velmi rychlých diod s dobou zotavení  $t_{\text{rr}} = 50$  až  $100 \text{ ns}$  [4]. Abychom diodu zvolili správně, potřebujeme znát maximální závěrné napětí a špičkovou, střední a efektivní hodnotu proudu protékajícího diodou.

Střední hodnota proudu diodou je žádaná hodnota DC proudu na výstupu z měniče  $I_2 = 2 \text{ A}$ . Efektivní hodnota je podle vztahu (2.10):  $I_{2\text{ef}} = 2,76 \text{ A}$ . Špičkovou hodnotu proudu diodou jsme určili podle vztahu (2.8):  $I_{2\text{max}} = 5,72 \text{ A}$ .

Maximální závěrné napětí na diodě je dáno jako součet napětí na sekundární cívce a napětí nabitého kondenzátoru. Viz Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Napětí na diodě

Podle obrázku č. 2.2 je zřejmé, že dle Kirchhoffova zákona pro napětí v uzavřené smyčce, musí platit:

$$U_{\text{rrm}} = U_{2\text{max}} + U_C = U_D \cdot k + U_2 = 325 \cdot 0,1071 + 15 = 50 \text{ V}. \quad (2.30)$$

Pro výše uvedené parametry byla vybrána dioda BYW29-200. Důležité parametry diody jsou uvedeny v tabulce č. 2.3.

Tab. 2.3: Parametry diody BYW29-200 [8]

| parametr         | hodnota | jednotka | poznámka                                  |
|------------------|---------|----------|---|
| $U_{\text{rrm}}$ | 200     | V        | maximální závěrné napětí diody            |
| $I_{\text{stř}}$ | 8       | A        | střední hodnota proudu                    |
| $I_{\text{FSM}}$ | 16      | A        | špičková hodnota proudu.                  |
| $U_f$            | 0,85    | V        | úbytek napětí na diodě v propustném směru |
| $t_{\text{rr}}$  | 35      | ns       | doba zotavení diody                       |

Pro zvolenou diodu vypočteme její ztrátový výkon. Výrobce neuvádí parametr  $R_{DS(ON)}$ , proto musíme pro výpočet ztrát použít zjednodušený vztah:

$$P_{ztr} = I_{2stř} \cdot U_f = 2 \cdot 0,85 = 1,7 \text{ W}. \quad (2.31)$$

V tuto chvíli můžeme vypočítat tepelný odpor chladiče. Teplotu okolí uvažujeme  $\vartheta_o = 40^\circ\text{C}$  a teplotu chladiče  $\vartheta_H = 60^\circ\text{C}$ .

$$R_{\vartheta H} = \frac{\vartheta_H - \vartheta_o}{P_{ztr}} - R_{\vartheta JC} = \frac{60 - 40}{1,7} - 3,0 = 17 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (2.32)$$

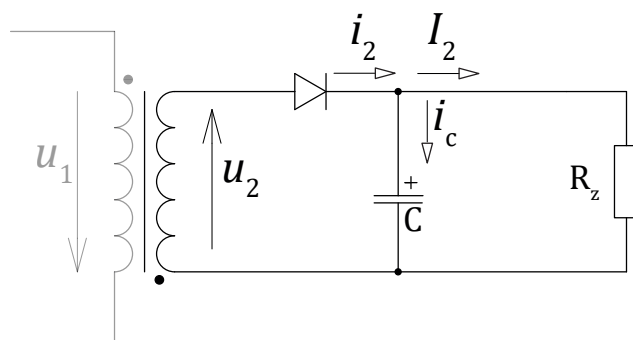
Hodnota tepelného odporu vyšla podobně jako v případě spínacího tranzistoru. Proto na chlazení diody použijeme stejný chladič jako v případě tranzistoru, neboť tranzistor i dioda mají stejné pouzdro – TO-220.

## 2.4 Dimenzování výstupního kondenzátoru

Při návrhu výstupního kondenzátoru vycházíme z obecné rovnice pro výpočet filtrační kapacity kondenzátoru.

$$C = I_C \frac{\Delta t}{\Delta u} \quad (2.33)$$

Zvlnění výstupního napětí volíme jako 1 % z nominální hodnoty výstupního napětí.  $\Delta u = 0,15 \text{ V}$ .



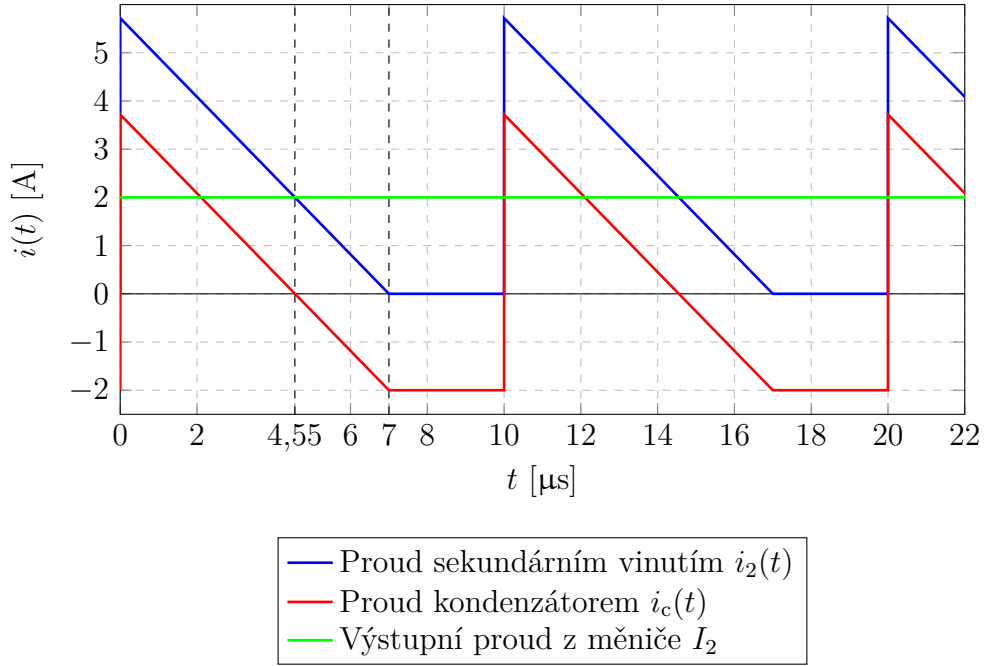
Obr. 2.3: Proud kondenzátorem

Je zřejmé, že pro proud procházející kondenzátorem musí platit:

$$i_c = i_2 - I_2. \quad (2.34)$$

Nabíjecí čas získáme z podobnosti trojúhelníků podle Obr. 2.4:

$$\frac{I_{2\max}}{T \cdot (1 - s)} = \frac{I_{2\max} - I_2}{t_{\text{nab}}}. \quad (2.35)$$



Obr. 2.4: Průběh proudů na sekundární straně transformátoru

Vyjádřením proměnné  $t_{\text{nab}}$  získáme:

$$t_{\text{nab}} = \frac{(1-s) \cdot (I_{2\text{max}} - I_2)}{f \cdot I_{2\text{max}}} = \frac{(1-0,301) \cdot (5,72 - 2)}{100000 \cdot 5,72} = 4,55 \mu\text{s} \quad (2.36)$$

Kapacitu kondenzátoru potom určíme ze vztahu (2.37).

$$C = I_C \cdot \frac{\Delta t}{\Delta u} = (I_{2\text{max}} - I_2) \cdot \frac{t_{\text{nab}}}{\Delta u} = (5,72 - 2) \cdot \frac{4,55 \cdot 10^{-6}}{0,15} = 112,8 \mu\text{F} \quad (2.37)$$

V praxi často volíme kapacitu výstupního kondenzátoru větší, abychom docílili lepší filtrace výstupního napětí.

Podle Obr. 2.4 vidíme, že výstupní kondenzátor je namáhán nabíjecím a vybíjecím proudem. Efektivní hodnota tohoto proudu způsobí tepelné ztráty na sériovém odporu kondenzátoru – ESR. Tyto ztráty jsou úměrné kvadrátu proudu a hodnotě odporu ESR.

$$P = R_{\text{ESR}} \cdot I_{\text{Cef}}^2 \quad (2.38)$$

Pro omezení těchto ztrát potřebujeme znát velikost efektivní hodnoty proudu kondenzátorem a velikost hodnoty odporu ESR použitého kondenzátoru.

$$I_{\text{Cef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_c^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \left( \int_0^{4,55 \cdot 10^{-6}} i_c^2(t) dt + \int_{4,55 \cdot 10^{-6}}^{7 \cdot 10^{-6}} i_c^2(t) dt + \int_{7 \cdot 10^{-6}}^{1 \cdot 10^{-5}} i_c^2(t) dt \right)} \quad (2.39)$$

$$I_{\text{Cef}} = 1,9 \text{ A} \quad (2.40)$$

Výstupní kondenzátor byl vybrán Low-ESR ze skladových zásob. Podle data-sheetu [11] je hodnota ESR odporu  $R_{\text{ESR}} = 0,05 \Omega$ . Ztrátový výkon na výstupním kondenzátoru je potom:

$$P = R_{\text{ESR}} \cdot I_{\text{Cef}}^2 = 0,05 \cdot 1,9^2 = 0,18 \text{ W}. \quad (2.41)$$

Z důvodu zlepšení chlazení, budou použity dva kondenzátory paralelně. Proud se rozdělí mezi kondenzátory a tím budou namáhány pouze poloviční efektivní hodnotou proudu  $I_{\text{Cef}} = 0,95 \text{ A}$ .

## 3 Řídicí obvod

Řídicí a budící obvody jsou neméně důležitou částí spínaného zdroje. Mají za úkol regulovat výstupní napětí a proud, aby se hodnoty výstupních veličin pohybovaly v žádaných mezích. Řízení lze vytvořit z dílčích součástek anebo použít již hotový integrovaný obvod, který počet součástek razantně zredukuje při zachování stejné funkčnosti.

S výhodou můžeme použít integrovaný obvod UCx84x firmy Texas Instruments. Obvody UCx84x jsou řídicí obvody pro off-line a DC-DC aplikace s pevnou frekvencí a minimálním počtem součástek. Integrovaný obvod obsahuje podpětové ochrany s nízkým spouštěcím proudem. Hlavní částí obvodu je PWM komparátor, který zajišťuje zpětnovazební proudovou regulaci. Budící obvody jsou dimenzované na řízení tranzistorů typu MOSFET s N-kanálem. Tyto obvody jsou dostupné v několika typech pouzder s různými podpětovými spouštěmi a v několika variantách maximální střídý. Výrobce nabízí tři varianty rozsahů teplot vhodných pro provoz. [7]

Výrobce označuje tento obvod jako *current mode PWM controller*, volněji to můžeme přeložit jako PWM kontrolér, řídicí střidu podle procházejícího proudu. U těchto obvodů se využívá toho, že při připojení konstantního napětí na indukčnost, touto indukčností začne procházet lineárně zvětšující se proud. Hodnota proudu je převedena snímačem proudu na napětí. Tato převedená hodnota procházejícího proudu je komparátorem v integrovaném obvodu porovnávána s nastavenou hodnotou. Výstup komparátoru ovlivňuje střidu spínání tranzistoru. Nespornou výhodou tohoto regulátoru je, že pracuje bez setrvačnosti a s minimálním zpožděním, které je dáno spínací frekvencí. Regulátor tedy reguluje proud několikrát rychleji než PID regulátor. Oproti PID regulátoru však neregulujeme přímo výstupní hodnotu proudu, ale jen proud indukčností.

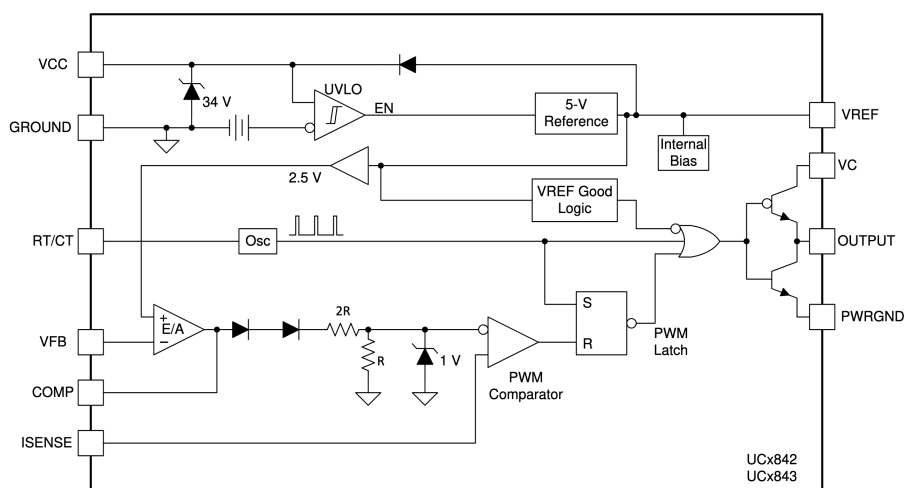
### 3.1 Popis pinů součástky

Pin COMP slouží pro monitoring výstupu chybového zesilovače a nebo jeho pomocí lze regulovat, respektive snížit výstupní napětí. Uzemněním tohoto pinu dojde k nastavení nulové střídý a tím k vypnutí výstupu spínaného zdroje.

Pin VFB je invertujícím vstupem chybového zesilovače. Zvyšováním napětí na tomto vstupu dochází ke snižování střídý.

Pin ISENSE slouží jako napěťový vstup z čidla proudu. Hodnota napětí je porovnávána na PWM komparátoru s napěťovou referencí 1 V. Pokud bude na čidle proudu úbytek napětí více jak 1 V, dojde k okamžitému zkrácení střídý a tím k vypnutí tranzistoru.





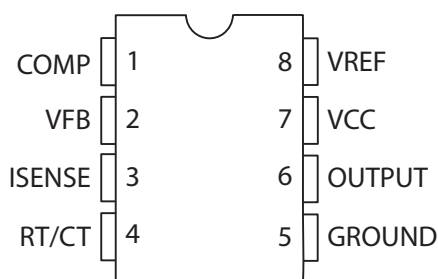
Obr. 3.1: Vnitřní zapojení IC UCx84x, překresleno z [7]

Pinem RT/CT se nastavuje spínací frekvence pomocí RC članku připojeného mezi piny VREF a GND. Doporučené hodnoty rezistoru jsou 5 – 100 k $\Omega$  a kondenzátoru 1 – 100 nF, dle [7].

Pin VREF je výstupem přesného referenčního napětí 5 V, je určený hlavně pro připojení RC članku pro nastavení frekvence.

Pin VCC slouží k napájení integrovaného obvodu. Obvod UC3844 vyžaduje napájecí napětí v rozsahu 10 V – 28 V.

Na pin OUTPUT se připojuje *gate* spínacího tranzistoru. Tento pin je schopný dodat proudový impuls až 1 A.



Obr. 3.2: Popis pinů IC UCx84x pro pouzdro SOIC a PDIP, převzato z [7]

## 3.2 Nastavení spínací frekvence zdroje

Pro nastavení spínací frekvence slouží RC článek připojený mezi piny VREF a RT/CT. Hodnoty součástek vycházejí z vlastností integrovaného obvodu. Podle [7] je vhodné

použit kondenzátor o hodnotě 1 nF, hodnota rezistoru se pak vypočítá podle rovnice (3.1) V rovnici uvažujeme dvojnásobnou spínací frekvenci, protože ve zdroji bude použit integrovaný obvod UC3844, který v sobě obsahuje děličku, díky které je maximální střída 50 % [7].

$$2 \cdot f = \frac{1,72}{R_T \cdot C_T} \rightarrow R_T = \frac{1,72}{2 \cdot f \cdot C_T} = \frac{1,72}{2 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 8600 \Omega \quad (3.1)$$

Z řady rezistorů bude vybrán rezistor 8,2 kΩ. Při ožiování bude spínací frekvence zkontrolována a případně doladěna, aby spínací frekvence odpovídala našim požadavkům.

### 3.3 Návrh snímače proudu

Variant snímače proudu je hned několik. Můžeme využít bočník na výstupu ze zdroje, proudový transformátor na sekundární straně nebo bočník mezi *source* tranzistoru a zemí meziobvodu.

První varianta bočníku na výstupu ze zdroje není vhodná, protože při maximálním výstupním proudu by na něm měl být napěťový úbytek 1 V. Při procházejícím proudu 2 A by výkonová ztráta byla 2 W. Současně s tím by se muselo vyřešit galvanické oddělení sekundární strany od primární.

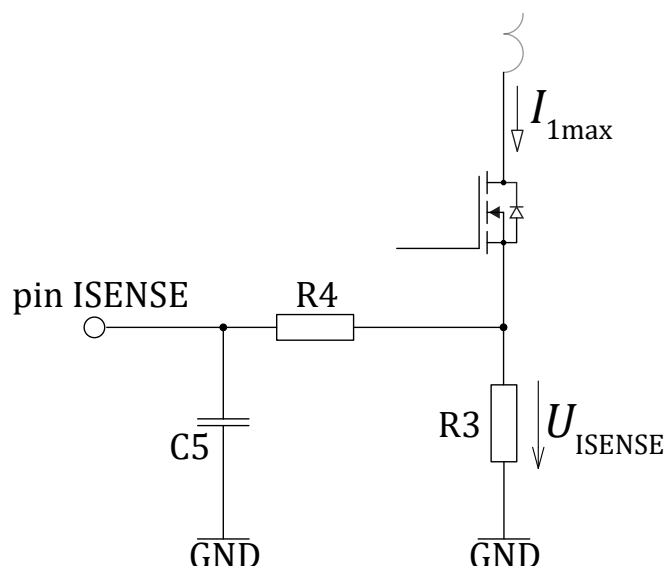
Další varianta snímacího proudového transformátoru by zabírala moc místa a byla by nákladnější.

Jako proudový snímač bude tedy využit snímací bočník na primární straně, který nezabere tolik místa a bude nejméně nákladný proti ostatním variantám. Snímání proudu bude zapojeno podle schématu na obrázku č. 3.3. Víme, že při maximálním výstupním výkonu bude maximální proud primárním vinutím  $I_{1\max} = 0,613$  A. Dále víme, že při maximálním proudu musí být na pinu ISENSE 1 V, při kterém začne PWM komparátor omezovat střidu spínání tranzistoru. Jednoduchým výpočtem podle rovnice (3.2) zjistíme hodnotu odporu snímacího rezistoru.

$$R_3 = \frac{U_{\text{Isense}}}{I_{1\max}} = \frac{1}{0,613} = 1,6 \Omega \quad (3.2)$$

Pro zabránění rušení a filtrování proudových špiček bude použit RC filtr složený z R4 a C5. Časová konstanta bude  $\tau_{RC} = 1 \mu\text{s}$ . Rezistor R4 volíme jako  $R_4 = 100 \Omega$ . Pak kondenzátor bude mít hodnotu podle rovnice:

$$C_5 = \frac{\tau_{RC}}{R_4} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{100} = 10 \text{ nF}. \quad (3.3)$$



Obr. 3.3: Schéma zapojení proudové zpětné vazby

### 3.4 Napěťová zpětná vazba

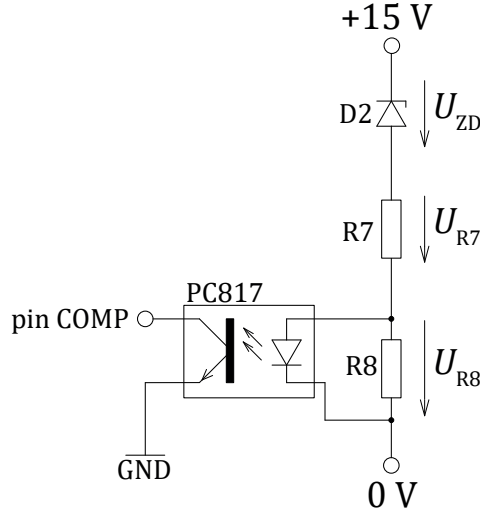
Pro udržení konstantního napětí na výstupu zdroje slouží obvod složený z optočlenu OK1 a napěťového děliče složeného z rezistorů R7 a R8 a zenerovy diody D2. Při zvýšení napětí na výstupu nad úroveň 15 V dojde k rozsvícení diody v optočlenu a tím pádem se začne fototranzistor optočlenu uzavírat. Uzavíráním tranzistoru dojde k přizemňování pinu COMP integrovaného obvodu. Následně dojde ke snížení napětí na PWM komparátoru, a tím dojde k omezení střidy spínání tranzistoru. Regulováním střidy je regulováno výstupní napětí.

Tab. 3.1: Parametry optočlenu PC817 [10]

| parametr   | hodnota | jednotka | poznámka                                  |
|------------|---------|----------|---|
| $U_f$      | 1,2     | V        | úbytek napětí diody v propustném směru    |
| $I_f$      | 5       | mA       | velikost proudu diodou v propustném směru |
| $I_c$      | 50      | mA       | maximální velikost proudu kolektorem      |
| $U_{izol}$ | 5       | kV       | izolační napětí optočlenu                 |

Zapojení napěťové zpětné vazby je provedeno podle schématu na Obr. 3.4. Pro stanovení hodnot rezistorů v děliči potřebujeme znát parametry optočlenu PC817, které jsou uvedeny v Tab. 3.1.

Pro omezení ztrát na rezistorech vložíme před dělič zenerovu diodu D2 se zenerovým napětím  $U_{ZD} = 13 \text{ V}$ . Napětí na diodě optočlenu je  $U_f = 1,2 \text{ V}$ . V tuto chvíli



Obr. 3.4: Schéma zapojení napěťové zpětné vazby

víme, jaký úbytek napětí musí být na rezistoru  $R_7$ .

$$U_{R7} = U_2 - U_{ZD} - U_f = 15 - 13 - 1,2 = 0,8 \text{ V}. \quad (3.4)$$

Pro výpočet děliče volíme  $R_8 = 1 \text{ k}\Omega$ . Proud diodou optočlenu je dle [10]  $I_f = 5 \text{ mA}$  V tuto chvíli nám už nic nebrání, abychom vypočítali hodnotu rezistoru  $R_7$ .

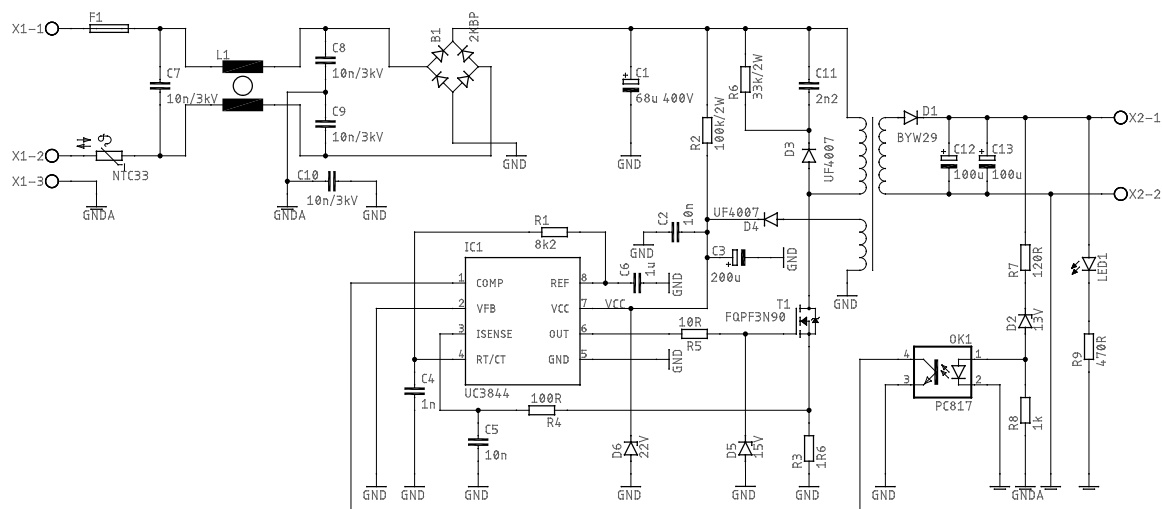
$$R_7 = \frac{U_{R7}}{I_f + \frac{U_f}{R_8}} = \frac{0,8}{5 \cdot 10^{-3} + \frac{1,2}{1000}} = 129 \Omega. \quad (3.5)$$

Z řady zvolíme hodnotu rezistoru  $R_7$  jako  $120 \Omega$ .

### 3.5 Schéma zapojení

Po připojení zdroje k napájecí síti se napájecí napětí dvoucestně usměrní Graetzovým můstkem. Usměrněným napětím se nabijí kondenzátory  $C1$  a  $C2$ . Špičkový proud, který může nastat při připojení zdroje v maximum napětí sítě, omezí NTC termistor. Přes rezistor  $R2$  se nabije kondenzátor  $C3$  a při dosažení úrovně napětí, při kterém přestane reagovat podpěťová spoušť dojde k zapnutí integrovaného obvodu  $IC1$ . Integrovaný obvod začne spínat tranzistor  $T1$ , při sepnutí tranzistoru dojde k připojení primárního vinutí transformátoru k nabitým kondenzátorům. Po vypnutí tranzistoru začne sekundárním vinutím procházet proud v propustném směru diody  $D1$ , tím dojde k nabíjení kondenzátorů  $C12$  a  $C13$ .

Při průchodu primárního proudu odporem  $R3$  na něm vzniká napětí, které je přes dolnoproustný RC filtr, složený z odporu  $R4$  a kondenzátoru  $C5$ , přivedeno na pin



Obr. 3.5: Schéma zapojení

č. 3 – ISENSE. Při překročení proudu nad nastavenou hodnotu dojde k okamžitému omezení střídý.

Výstupní napětí je regulováno pomocí optočlenu OK1. Zenerově dioda D2 a odpor R7 nastavují pracovní bod optočlenu. Při 15 V na výstupu zdroje, dioda v optočlenu nesvítí. Při překročení tohoto napětí dojde k rozsvícení diody a tím k uzavírání fototranzistoru v optočlenu. Jeden z výstupních pinů optočlenu je uzemněn, druhý pin je připojen na pin COMP integrovaného obvodu. Uzemňováním tohoto pinu dochází k omezování střídý a tím dojde ke snížení výstupního napětí zdroje.

Sítový filtr složený z kondenzátorů C7, C8 a C9 a tlumivky L1 slouží k filtrování vysokofrekvenčních signálů, které vytváří spínaný zdroj. Tyto vysokofrekvenční signály jsou v distribuční soustavě nežádoucí a jsou brány jako rušení, protože mohou ovlivňovat správnou funkčnost dalších zařízení.

Ve schématu si dále můžeme všimnout oddělení silové a výstupní země. Z hlediska bezpečnosti je výstup galvanicky oddělen od vstupních částí, která je napájena sítovým napětím. o galvanické oddělení se stará izolace mezi primárním a sekundárním vinutím, dále optočlen OK1 a kondenzátor C10, který odděluje zem silové části zdroje od výstupu. Aby byla zajištěna maximální ochrana obsluhy, je výstupní záporný potenciál připojen k ochrannému vodiči PE.

Jako indikátor zapnutí zdroje slouží LED dioda na výstupu měniče. Pokud je na výstupu napětí, dioda svítí a tím upozorňuje obsluhu, že je zdroj v chodu.

## 4 Návrh a realizace DPS

V této kapitole se budeme věnovat návrhu desky plošných spojů a realizaci komponent, které jsme v předchozích kapitolách vypočítali.

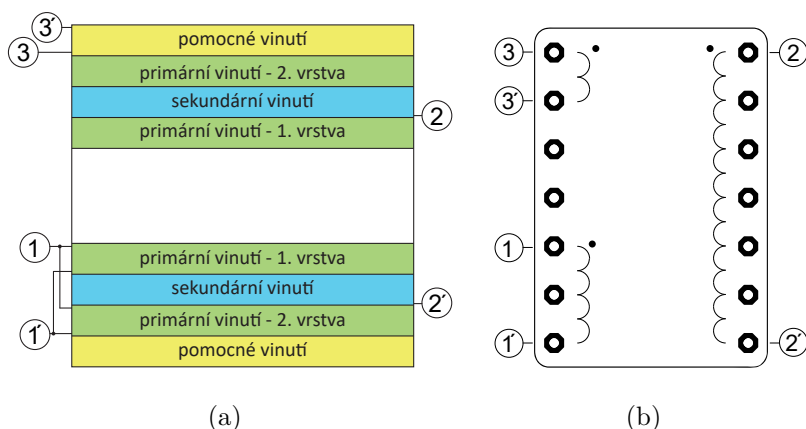
### 4.1 Transformátor

Součástí realizace spínaného zdroje je i ruční navinutí vysokofrekvenčního transformátoru. Navržené parametry jsou uvedeny v Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Navržené a reální parametry vinutí

| vinutí     | počet závitů | vypočtené průřezy vodičů | použité vodiče                        |
|------------|--------------|--------------------------|---------------------------------------|
| Primární   | 47 z.        | $0,065 \text{ mm}^2$     | $30 \times 0,05 \text{ mm}$ bifilárně |
| Sekundární | 5 z.         | $0,92 \text{ mm}^2$      | $30 \times 0,2 \text{ mm}$            |
| Pomocné    | 3 z.         | $0,1 \text{ mm}^2$       | $1 \times 0,35 \text{ mm}$            |

Pro všechna vinutí, která mají průměr větší než dvojnásobek hloubky vniku jsou použity vodiče RUPALIT® pro vysokofrekvenční aplikace. Vodiče o menším průměru jsou navinuty měděným drátem s lakovou izolací. Pro zajištění odpovídajícího galvanického oddělení výstupu od vstupu jsou vinutí transformátoru od sebe izolovány transformátorovou páskou. Po navinutí vinutí transformátoru byla následně upravena vzduchová mezera tak, aby se naměřená indukčnost primárního vinutí blížila k indukčnosti vypočtené. Vzduchová mezera je tvořena vrstvou transformátorové pásky.

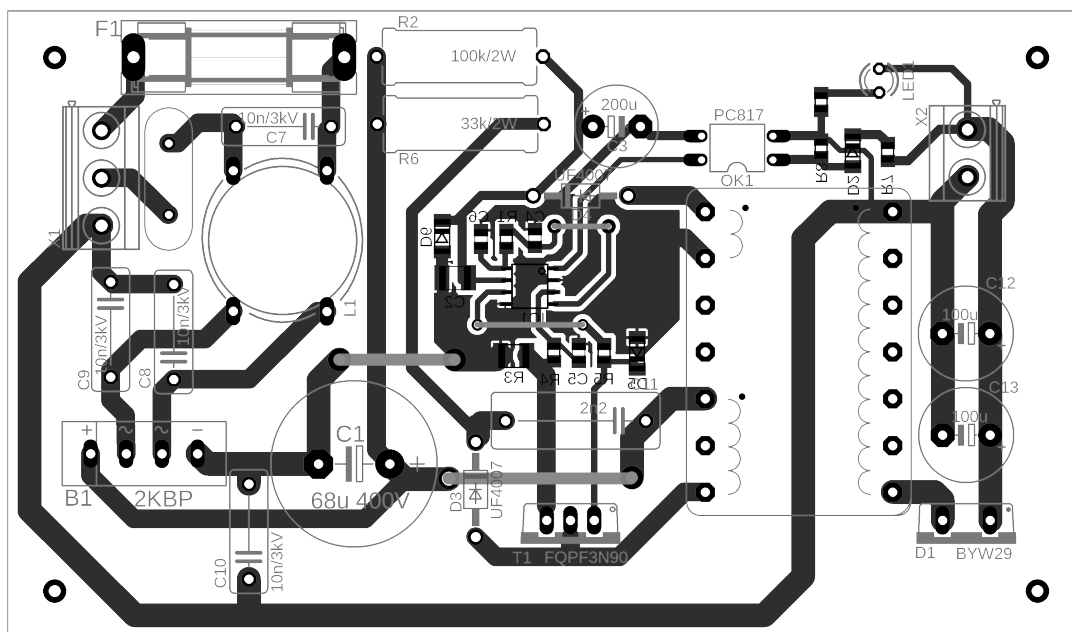


Obr. 4.1: Uspořádání vrstev vinutí na kostře transformátoru (a) a zapojení začátků a konců vinutí na piny transformátoru (b)

Aby byla zajištěna co nejlepší vazba mezi primárním a sekundárním vinutím, je sekundární vinutí vloženo mezi dvě vrstvy primárního vinutí. Obr. 4.1 názorně ukazuje uspořádání vrstev vinutí v řezu transformátoru.

## 4.2 Deska plošných spojů

Deska plošných spojů byla navržena jako jednovrstvá pro součástky v THT a SMD pouzdrech. Silová část obvodu (síťový filtr, meziobvod, výkonový tranzistor transformátor a výstupní dioda s kondenzátory) je v provedení THT z důvodu lepšího odvodu tepla. Řídící obvody nejsou silově namáhány proto z důvodu miniaturizace jsou v provedení SMD. Všechny SMD součástky jsou osazovány ze strany spojů. Rozměry DPS jsou 115 mm × 62 mm.



Obr. 4.2: Navržená deska plošných spojů s rozmístěním všech součástek

Při návrhu byl kladen důraz na zmenšení plochy smyčky primárního obvodu, která je složena z kondenzátorů C1 a C11, diody D3, rezistoru R3 a spínacího tranzistoru T1. Velikost smyčky ovlivňuje parazitní sériovou indukčnost. Čím je smyčka větší, tím je parazitní indukčnost větší a má za následek negativní překmit při vypínání tranzistoru.

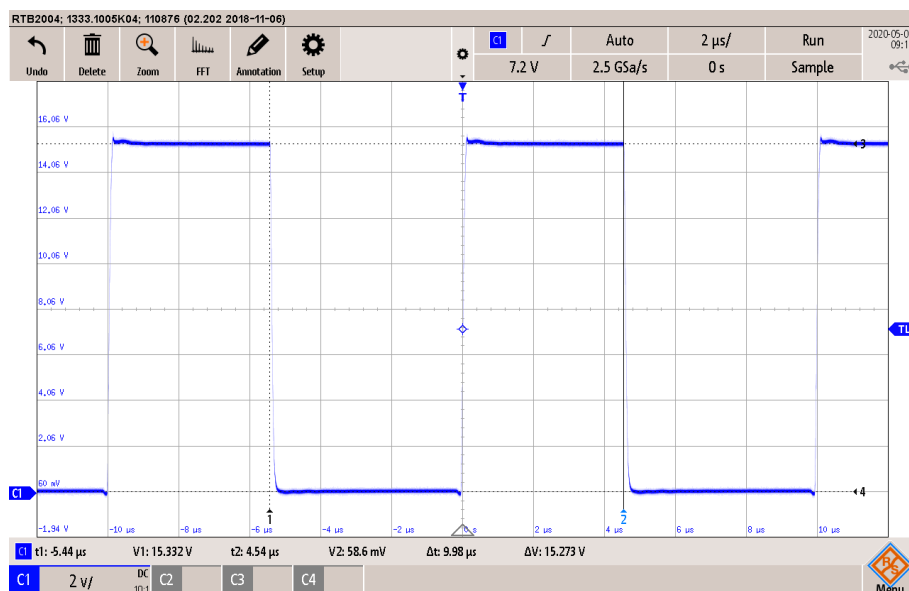
V přílohách naleznete podklad pro výrobu DPS, rozpisku materiálu a osazovací plán pro každou stranu DPS.

## 5 Oživení a měření

Po osazení a zkontrolování všech součástek můžeme přistoupit k oživení zdroje.

### 5.1 Řídící obvody

Jako první ověříme funkčnost řídicího obvodu UC3844. Mezi piny VCC a GND řídicího obvodu připojíme laboratorní zdroj. Postupně budeme zvyšovat napájecí napětí řídicího obvodu až nad úroveň 17,5 V. Integrovaný obvod totiž obsahuje podpětiovou ochranu, která dovolí zapnutí obvodu až při dosažení prahového napájecího napětí. V případě obvodu UC3844 je toto napětí právě  $U_{th} = 17,5 \text{ V}$  [7]. Pomocí osciloskopu připojeného mezi *gate* a *source* tranzistoru uvidíme pravidelné obdélníkové pulzy o maximální střídě  $s = 0,5$  a výšce přibližně 15 V.



Obr. 5.1: Průběh  $U_{GS}$ , IC napájeno z pomocného zdroje

Na Obr. 5.1 vidíme průběh napětí na *gate* tranzistoru. Budící pulzy mají velikost 15,3 V a frekvenci můžeme určit podle trvání jedné periody.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{9,98 \cdot 10^{-6}} = 100,2 \text{ kHz} \quad (5.1)$$

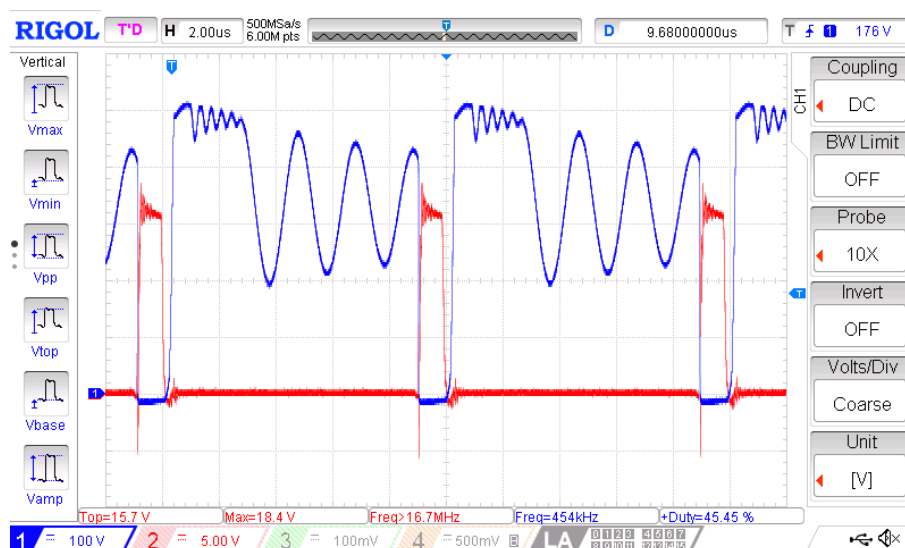
Podle rovnice (5.1) vidíme, že je frekvence spínání tranzistoru téměř shodná s požadovanými 100 kHz. Proto není zapotřebí upravovat hodnoty odporu R1 a kondenzátoru C4.

Dále bylo změřeno, že integrovaný obvod se zapíná při napětí  $U_{VCC} = 17,1 \text{ V}$  a vlivem hystereze [7] je schopný pracovat až do hodnoty napětí 10,9 V.



## 5.2 Silová část zdroje a regulace napětí

Pokud je vše v pořádku, připojíme zdroj na laboratorní autotransformátor. Výstup z autotransformátoru usměrníme pomocí usměrňovače a připojíme přímo do meziobvodu zdroje. Dále připojíme stejnosměrný laboratorní zdroj pro napájení integrovaného obvodu. Na zdroji nastavíme takovou hodnotu napětí, při kterém podpěťová ochrana spustí integrovaný obvod. Na výstup spínaného zdroje připojíme společně s voltmetrem a ampérmetrem ohmickou zátěž o takové velikosti, aby byl zdroj zatížen přibližně na desetinu svého výstupního výkonu. Dále připojíme osciloskop mezi *drain* a *source* a mezi *gate* a *source* tranzistoru. Zkontrolujeme měřicí pracoviště a poté autotransformátorem postupně zvyšujeme napětí v meziobvodu. Při dosažení požadovaného výstupního napětí zdroje na osciloskopu vidíme, že dochází k omezení střídy. Omezení střídy má za následek regulaci výstupního napětí. Tuto regulaci automaticky obstarává řídicí obvod.



Obr. 5.2: Průběh  $U_{GS}$  (červeně) a  $U_{DS}$  (modře) při nominální zátěži

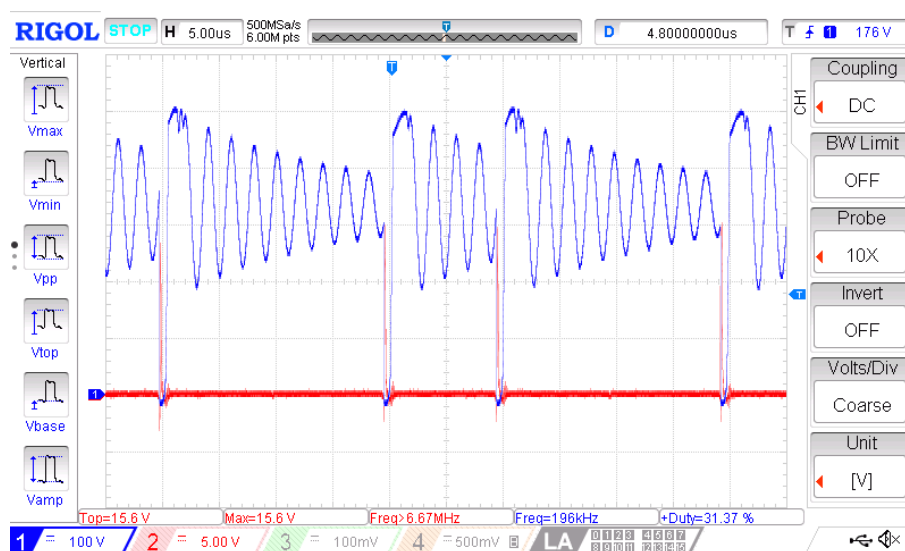
Na obrázku č. 5.2 vidíme dva průběhy. Červeně je znázorněn průběh budícího signálu na *gate* tranzistoru a modře je znázorněn průběh mezi *drain* a *source* tranzistoru. Na první pohled si můžeme všimnout, že oproti Obr. 5.1 je střída spínání menší, v tomto případě asi  $s = 0,2$ . Během sepnutí tranzistoru se napětí  $U_{DS}$  blíží nule a do jádra, potažmo vzduchové mezery se akumuluje energie.

Na průběhu si můžeme všimnout obdélníkového pulzu se superponovanou sinusovkou, který trvá přibližně  $3\mu s$ . Během této doby dochází k demagnetování jádra transformátoru, sekundární diodou prochází proud. Sinusovka, která je nasuperponována na obdélníkový pulz je produktem jednak sériového rezonančního obvodu  $L_1$  a  $C_{DS}$  a jednak RC obvodu pro omezení překmitu na tranzistoru. Po

demagnetování transformátoru přestává procházet proud diodou  $D_4$  a na primární straně vznikne sériový rezonanční obvod složený z parazitní kapacity  $C_{DS}$  mezi *drain* a *source* tranzistoru a indukčností primárního vinutí. Frekvenci těchto kmitů lze určit podle Thompsonova vztahu (5.2):

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \cdot C_{DS}}}. \quad (5.2)$$

### 5.2.1 Vynechávání pulzů

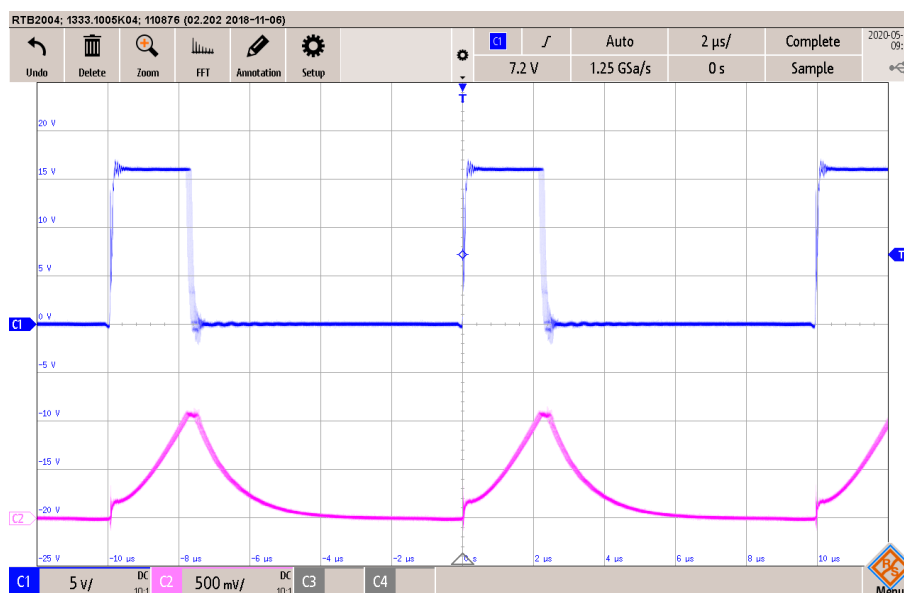


Obr. 5.3: Průběh  $U_{GS}$  (červeně) a  $U_{DS}$  (modře)

Obrázek č. 5.3 ukazuje průběh napětí na tranzistoru ve chvíli, kdy je zdroj bez zátěže nebo je jen nepatrně zatížen. Na první pohled vidíme, že dochází k vynechávání pulzů na *gate* tranzistoru. Toto vynechávání pulzů je způsobeno tím, že na výstupu zdroje není dostatečný odběr a výstupní napětí je stále na žádané hodnotě. Regulátor obsahuje funkci, která přemostí výstup PWM, a tím dočasně vypne tranzistor. Během doby, kdy byl jeden pulz vynechán dojde k poklesu výstupního napětí. Na tuto skutečnost reaguje regulace a znovu zapne tranzistor. Díky tomu se výstupní napětí dostane opět na žádanou hodnotu.

## 5.3 Regulace proudu

Pro bezchybný chod řešeného spínaného zdroje je nezbytná regulace proudu, aby nedošlo k poškození zdroje ani napájeného zařízení. Při dosažení maximálního výstupního proudu bude docházet k omezení střídý a tím i výstupního výkonu, který se projeví poklesem výstupního napětí.

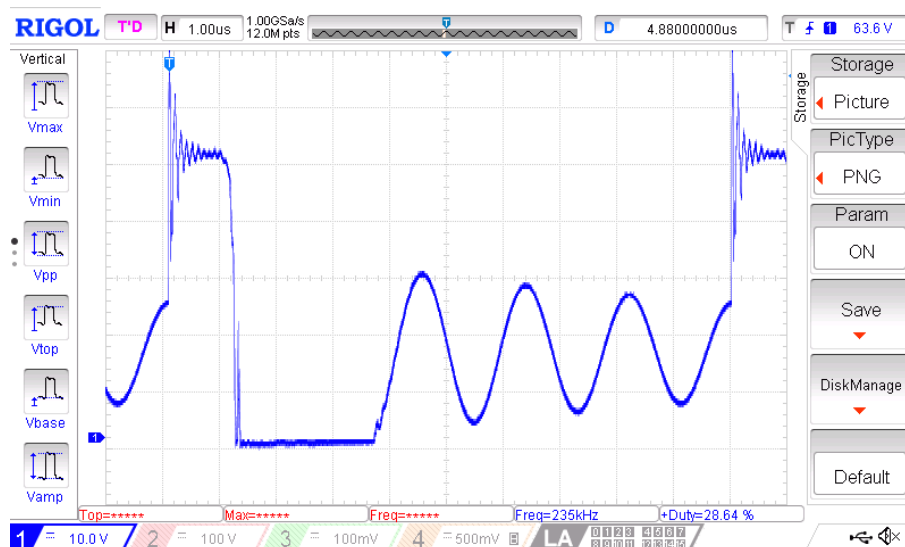


Obr. 5.4: Průběh  $U_{GS}$  (modře) a  $U_{ISENSE}$  (fialově)

Obr. 5.4 zachycuje průběh budícího signálu na *gate* tranzistoru (modře), fialově je zaznačen průběh na snímacím pinu ISENSE řídicího obvodu, který pochází ze snímacího bočníku. Můžeme vidět, že maximum tohoto signálu má hodnotu 1 V. Při dosažení této hodnoty napětí obvod UC3844 vypíná tranzistor. Bočníkem přestane procházet proud a napětí na bočníku zmizí. Kdyby nastala v obvodu chyba a nedošlo by k vypnutí tranzistoru, proud bočníkem by nadále lineárně rostl a na výstupu by proud překročil dovolenou hodnotu a hrozilo by tak zničení napájeného zařízení a pravděpodobně i zdroje.

Dále si můžeme všimnout, že fialový průběh  $U_{ISENSE}$  je zaoblen, to je způsobeno filtračním RC článkem složeným z R4 a C5. Díky tomu průběh není výrazně zarušen, to vede ke spolehlivějšímu chodu zdroje.

## 5.4 Výstupní dioda



Obr. 5.5: Průběh na výstupní diodě D1

Na Obr. 5.5 vidíme průběh napětí na výstupní diodě. Překmit dosahuje velikosti přibližně 80 V. Použití 200V výstupní diody s sebou tedy nese dostatečnou rezervu.

Při zapnutí tranzistoru je na diodě napětí orientováno v závěrném směru a proud diodou neprotéká. Na obdélníku můžeme vidět nasuperponované *vf* tlumené kmitání, které je způsobeno přechodovými jevy při zapínání primárního vinutí. Následuje přechod diody do vodivého stavu. Úbytek na diodě je v tuto chvíli 0,85 V. Po demagnetování transformátoru následují asi 3 periody tlumených kmitů. Toto kmitání je způsobeno sériovým LC obvodem na primární straně a přes vazbu transformátoru je převedeno na sekundární stranu.

## 5.5 Měření účinnosti

Na závěr bylo provedeno měření účinnosti a vlastní spotřeby zdroje. Zdroj byl napájen usměrněným napětím ze sítě. Zároveň bylo měřeno napětí a proud na vstupu i na výstupu.

Tab. 5.1: Vlastní spotřeba zdroje

| $U_1$ [V] | $I_1$ [mA] | $P_1$ [W] |
|-----------|------------|-----------|
| 325       | 9,2        | 3         |

Vlastní spotřeba zdroje byla určena z odebíraného výkonu, výstupní svorky byly rozpojeny. Při nulové zátěži zdroj odebíral 9,2 mA při napětí 325 V. Výkon byl vypočten podle rovnice (5.3).

$$P = U \cdot I = 325 \cdot 9,2 \cdot 10^{-3} = 3 \text{ W} \quad (5.3)$$

Účinnost byla měřena s odporovou zátěží na výstupu. Výpočet účinnosti je uveden v rovnici (5.4).

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1} = \frac{14,9 \cdot 1,5}{360 \cdot 84,5 \cdot 10^{-3}} = 0,74 = 74 \% \quad (5.4)$$

Tab. 5.2: Účinnost zdroje

| $U_1$ [V] | $I_1$ [mA] | $P_1$ [W] | $U_2$ [V] | $I_2$ [A] | $P_2$ [W] | $\eta$ [%] |
|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 360       | 19,4       | 7,0       | 14,9      | 0,3       | 4,5       | 64         |
| 360       | 36,5       | 13,1      | 14,9      | 0,52      | 7,7       | 59         |
| 360       | 53,4       | 19,2      | 14,9      | 0,84      | 12,5      | 65         |
| 360       | 84,5       | 30,2      | 14,9      | 1,5       | 22,4      | 74         |

Dále bylo změřeno, že zdroj začíná bezchybně pracovat při 142 V na vstupu.

# Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout síťový spínaný zdroj pro napájení pomocných obvodů 20kW zdroje v laboratoři. Vyrobený zdroj má výstupní stejnosměrné napětí 15 V a v zátěži dokáže přenést výkon až 30 W. S ohledem na rozpočet byla zvolena koncepce blokujícího měniče. Navržený spínaný zdroj obsahuje zpětnovazební regulaci napětí s nadřazenou proudovou ochranou, která zajistí ochranu zdroje při náhodném zkratování výstupních svorek.

V teoretické části je popsána činnost blokujícího měniče a v kapitolách č. 1.1 a č. 1.2 jsou popsány dva možné režimy, ve kterých může měnič pracovat. Pro docílení vyšší stability zdroje byl vybrán režim s nespojitým magnetickým tokem, tato volba je zdůvodněna v kapitole č. 1.3.

Druhá část práce se zabývá návrhem silové části spínaného zdroje. Přibližně polovina této kapitoly je věnována návrhu transformátoru. Zbytek je zaměřen na dimenzování polovodičových součástek, tranzistoru a výstupní diody. Chlazení výkonových součástek je zajištěno pomocí pasivních chladičů z ohýbaného hliníkového plechu.

Jako řídicí obvod byl vybrán integrovaný obvod UC3844, který pro svoji funkci potřebuje minimum dalších součástek. Integrovaný obvod zajišťuje buzení výkonového tranzistoru typu MOSFET s N-kanálem a zároveň se stará o regulaci výstupního napětí a proudu. Střída je u těchto obvodů řízena proudovou zpětnou vazbou. V našem případě je proud snímán pomocí bočníku na primární straně, kdy 1 V na bočníku odpovídá maximálnímu dovolenému proudu.

Kapitola č. 4 je zaměřena na návrh desky plošných spojů a výrobu transformátoru.

Po vyrobení a osazení DPS byl zdroj oživen a proběhlo na něm základní měření. Výstup tohoto měření je v kapitole č. 5. Zdroj pracoval hned při prvním zapojení bez výrazných komplikací. Zdroj se zapíná při vstupním napětí 140 V. V klidovém režimu zdroj spotřebovává 3 W.

Při měření účinnosti byla naměřena účinnost v rozmezí 60 – 75 %. Tak nízkou účinnost má na svědomí zřejmě obvod pro snižování přepětí na tranzistoru, ve kterém se energie uvolňuje v podobě tepla. Vhodnější by byla varianta s LC článkem pro docílení minimálních ztrát.

# Literatura

- [1] NOVOTNÝ, Vlastislav, Pavel VOREL a Miroslav PATOČKA. *Napájení elektronických zařízení*. Vyd. 2. Brno: Zdeněk Novotný, 2000. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1737-4.
- [2] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. Vyd. 1. V Brně: VUTIUUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [3] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky*. Vyd. 3. Brno: Zdeněk Novotný, 2004. ISBN 80-214-2743-4.
- [4] PÁR, Lukáš. *DC/DC měnič s transformátorem 24 V / 350 V / 100 VA*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117497>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Pavel Vorel.
- [5] Datasheet jádra ETD2910. *Semic Trade* [online]. [cit. 2019-10-30]. Dostupné z: [https://www.semic.cz/\\_obchody/semic.obchodak.net/prilohy/7183/lj-etd2910-cf139-13afd6.pdf](https://www.semic.cz/_obchody/semic.obchodak.net/prilohy/7183/lj-etd2910-cf139-13afd6.pdf)
- [6] Datasheet kostry pro jádro ETD2910. *Semic Trade* [online]. Praha, 2015 [cit. 2019-10-30]. Dostupné z: [https://www.semic.cz/\\_obchody/semic.obchodak.net/prilohy/7291/lj-etd2910vp-14p-1s-cf-0c6213.pdf](https://www.semic.cz/_obchody/semic.obchodak.net/prilohy/7291/lj-etd2910vp-14p-1s-cf-0c6213.pdf)
- [7] Datasheet integrovaného obvodu UCx84x. *Texas Instruments* [online]. Dallas, 2019 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uc3844.pdf>
- [8] Datasheet k diodě BYW29-200. *ON Semiconductor* [online]. Denver, 2008 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/BYW29-D.pdf>
- [9] Datasheet k tranzistoru FQPF 3N90. *Fairchild Semiconductor* [online]. Sunnyvale, 2008 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <http://www.chipfind.net/datasheet/pdf/fairchild/fqpf3n90.pdf>
- [10] Datasheet k optočlenu PC817. *Sharp* [online]. Ósaka, 2018 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: [https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/PC817XxNSZ1B\\_e.pdf](https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/PC817XxNSZ1B_e.pdf)

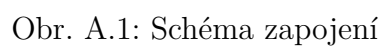
- [11] Datasheet k výstupnímu kondenzátoru. *Hitano* [online]. New Taipei City, 2016 [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: [http://www.hitano.com.tw/wp-content/uploads/doc/ESX\\_20160520.pdf](http://www.hitano.com.tw/wp-content/uploads/doc/ESX_20160520.pdf)



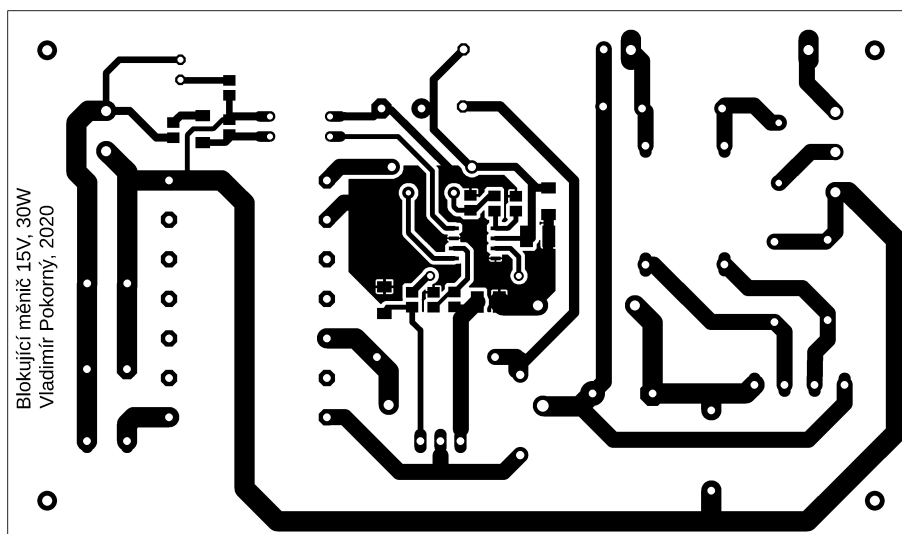
# Seznam příloh

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>A Přílohy</b>                | <b>46</b> |
| A.1 Schéma zapojení . . . . .   | 46        |
| A.2 Plošný spoj . . . . .       | 47        |
| A.3 Osazovací plány . . . . .   | 47        |
| A.3.1 Strana součástí . . . . . | 47        |
| A.3.2 Strana spojů . . . . .    | 48        |
| A.4 Seznam součástí . . . . .   | 49        |

## A.1 Schéma zapojení



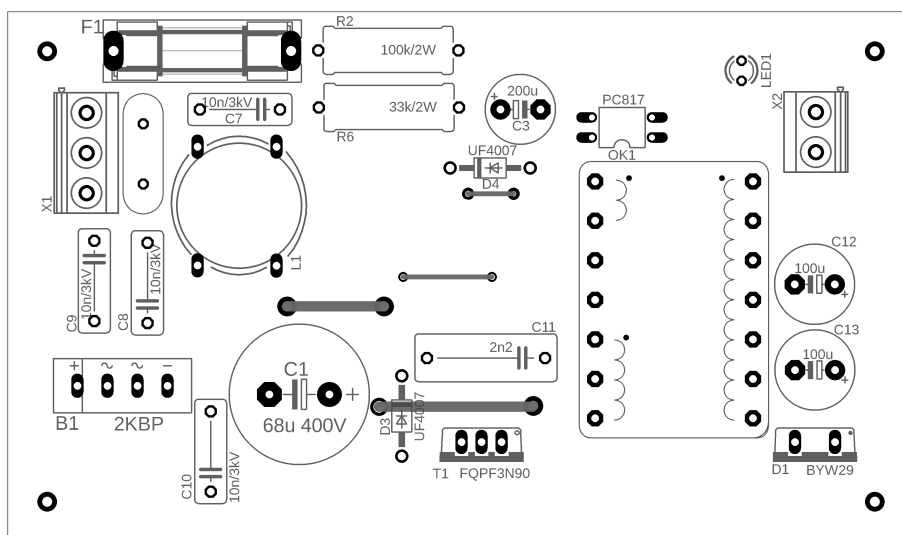
## A.2 Plošný spoj



Obr. A.2: Plošný spoj

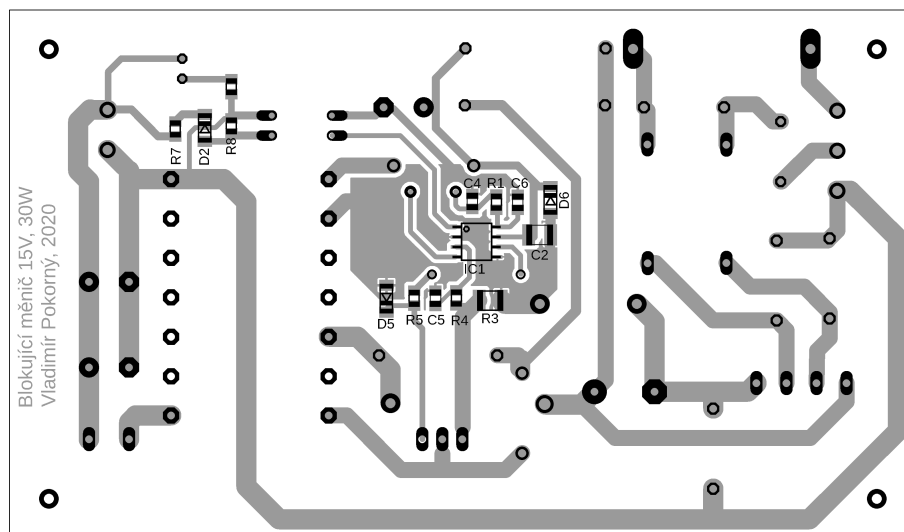
## A.3 Osazovací plány

### A.3.1 Strana součástek



Obr. A.3: Osazovací plán – pohled ze strany součástek

### A.3.2 Strana spojů



Obr. A.4: Osazovací plán – pohled ze strany spojů

## A.4 Seznam součástek

Tab. A.1: Seznam součástek

| označení | hodnota                    | pouzdro            |
|----------|----------------------------|--------------------|
| B1       | KBP208G                    | 2KBP               |
| C1       | 68 $\mu$ F 400 V           | E7,5-18            |
| C2       | 10n                        | C1210              |
| C3       | 200 $\mu$ F                | E5-8,5             |
| C4       | 1 nF                       | C0805              |
| C5       | 10 nF                      | C0805              |
| C6       | 1 $\mu$ F                  | C0805              |
| C7 – C10 | 10 nF/3kV                  | C43X133            |
| C11      | 2,2 nF                     | C64X183            |
| C12, C13 | 100 $\mu$ F                | E2.5-6             |
| D1       | BYW29-200 <sup>1</sup>     | TO-220             |
| D2       | zenerova dioda 13 V        | SOD80C             |
| D3, D4   | UF4007                     | UF4003             |
| D5       | zenerova dioda 15 V        | SOD80C             |
| D5       | zenerova dioda 22 V        | SOD80C             |
| LED1     | zelená led dioda           | LED 3 mm           |
| F1       | pojistkové pouzdro         | SH22,5             |
| IC1      | UC3844                     | SOW8               |
| L1       | CAF1100A6.8                | R14                |
| NTC      | 33 $\Omega$                | NTC33              |
| OK1      | PC817                      | DIP4               |
| R1       | 8,2 k $\Omega$             | R0805              |
| R2       | 100 k $\Omega$ /2W         | R617/17            |
| R3       | 1,6 $\Omega$               | R1210              |
| R4       | 100 $\Omega$               | R0805              |
| R5       | 10 $\Omega$                | R0805              |
| R6       | 33 k $\Omega$ /1W          | R411/12            |
| R7       | 120 $\Omega$               | R0805              |
| R8       | 1 k $\Omega$               | R0805              |
| R9       | 470 $\Omega$               | R0805              |
| T1       | FQPF 3N90 <sup>2</sup>     | TO-220             |
| TR       | transformátor <sup>3</sup> | ETD2910            |
| X1       | AK500/3                    | rozteč vývodů 5 mm |
| X2       | AK500/2                    | rozteč vývodů 5 mm |

<sup>1</sup>Může být použita dioda splňující parametry dle Tab. 2.3.

<sup>2</sup>Může být použit jakýkoliv tranzistor splňující parametry dle Tab. 2.2.

<sup>3</sup>Navinut dle navíjecího předpisu podle Tab. 4.1.